



Estudo das tensões residuais de um *package fan-out*

LUÍS GONÇALO MORAIS ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS

ORIENTADOR

MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA

CO-ORIENTADORES

ANDRÉ CARDOSO - Nanium, SA

LUCAS FILIPE MARTINS DA SILVA - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1. Resumo

As tensões residuais, transversais a qualquer indústria, são um encargo cada vez mais pesado na indústria de semicondutores. Estas tensões criam-se devido à marcada diferença de CTE (coeficiente de expansão térmica) de dois materiais ligados: o silício e uma resina epoxi. Na necessidade de controlo de tal defeito o conhecimento da distribuição e magnitude das tensões é premente. O presente trabalho pretende estudar a magnitude destas tensões que se formam. Realizado em parceria com a empresa Nanium o trabalho foca-se no processo de fabrico de um *package eWLB* (Embedded Wafer Level Ball Grid Array), mais especificamente na etapa de produção de *mold wafer* onde através de calor e pressão se liga o *EMC* (do inglês *epoxy mold compound*, é a resina epoxi) ao Si.

2. Palavras-chave

Tensões residuais, CTE, *package eWLB*;

3. Abstract

Residual stresses, present among all manufacturing processes, are an increasingly heavy problem on the semiconductor industry. The stresses are created due to the marked difference in CTE of two bonded materials: silicon and EMC. In order to control such defect is urgent to improve the knowledge of the distribution and magnitude of this stresses. This study aims to determine the magnitude of present stresses in the manufacturing process of an eWLB package, focusing on *wafer mold* production stage, where through heat and pressure EMC and Si are bound.

4. Agradecimentos

Ao professor Manuel Vieira, por ter aceite o desafio de orientar este trabalho. Por toda a disponibilidade e o acompanhamento.

Ao Eng.º André Cardoso por me ter acompanhado por todo este percurso de tese em ambiente empresarial, responsável por toda a minha inclusão na Nanium, e que tornou este trabalho possível.

Ao professor Lucas da Silva, e sua equipa de adesivos do departamento de engenharia mecânica, por toda a ajuda prestada nesse campo e da simulação.

Ao pessoal do Departamento de Metalurgia e Materiais, especialmente ao Sr. Ramiro por toda ajuda e disponibilidade.

À Nanium e todos os seus colaboradores que duma forma ou outra estiveram presentes e incorporados neste trabalho.

Ao CEMUC, nomeadamente às professoras Sofia Ramos e Teresa Vieira por toda a ajuda e disponibilidade prestadas.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, tios, e irmãos, por me terem proporcionado todas as condições para este meu percurso académico, e por sempre me ajudarem nos momentos de maior dificuldade.

Aos meus amigos, em especial aos amigos do remo e de curso, que desde sempre me acompanham, apoiaram e ajudaram.

Índice

1.	RESUMO	I
2.	PALAVRAS-CHAVE	I
3.	ABSTRACT	II
4.	AGRADECIMENTOS	III
5.	ÍNDICE DE FIGURAS	VI
6.	ÍNDICE DE TABELAS	VIII
7.	ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E NOTAÇÕES	IX
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	NANIUM	7
3.	PROCESSO EWLb	9
3.1	MOLDAÇÃO/MOLD WAFER	14
3.1.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	15
3.1.2	MATERIAIS NO PACKAGE: SILÍCIO	16
3.1.3	MATERIAIS NO PACKAGE: RESINA EPOXI	17
3.1.4	CURA	18
4.	CONTRAÇÃO/EXPANSÃO	19
4.1	CTE, COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA	20
4.2	CONTRAÇÃO QUÍMICA	21
5.	TENSÃO	23
5.1	TENSÕES RESIDUAIS	23
6.	DIE SHIFT	25

7.	TRABALHO REALIZADO	26
7.1	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)	26
7.1.1	SIMULAÇÃO	27
7.1.2	DESLOCAMENTOS	30
7.1.3	TENSÃO	31
7.2	PRODUÇÃO DE WAFERS	33
7.2.1	PRODUÇÃO DE 3 WAFERS COM MOLD COMPOUND COM DIFERENTES NÍVEIS DE CURA.	33
7.2.2	PRODUÇÃO DE 2 WAFERS PARA ENSAIOS E MEDIÇÕES	36
7.3	ANÁLISE DE TENSÕES PELA EQUAÇÃO DE STONEY	36
7.3.1	EQUAÇÃO DE STONEY	36
7.3.2	APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE STONEY – DESVIO DE RAIO LASER	38
7.4	ANÁLISE DE TENSÕES POR RELAXAMENTO DE TENSÕES	47
7.4.1	RELAXAMENTO DE TENSÕES POR PROCESSOS TÉRMICOS E USO DE EXTENSÓMETROS PARA LEITURA DE DEFORMAÇÕES	47
8.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO	51
9.	BIBLIOGRAFIA	54
10.	ANEXOS	60

5. Índice de figuras

FIGURA 1 - EXEMPLO DE UM CIRCUITO INTEGRADO	1
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DOS TRANSÍSTORES E SUAS CAPACIDADES.	2
FIGURA 3 - CUSTO POR UNIDADE DE PROCESSADOR E VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO TAMANHO	3
FIGURA 4 - CLEANROOM E OPERÁRIOS COM FATO PRÓPRIO.....	4
FIGURA 5 - ESTADOS DO IC AO LONGO DO CICLO DE PRODUÇÃO (EM CIMA); IMAGEM DE UMA WAFER E WLB TIPO. COM APLIAÇÃO SOBRE UM DIE. E POSTERIORMENTE PARA AS BOLAS DE SOLDAS NOS BALL PADS (EM BAIXO)	5
FIGURA 6 - LOGÓTIPO DA NANIAM.....	7
FIGURA 7 - NANIAM DESDE A SUA GÊNESE ATÉ AOS DIAS DE HOJE	7
FIGURA 8 - INSTALAÇÕES DA NANIAM, VILA DO CONDE.....	8
FIGURA 9 - LOGÓTIPOS DAS VÁRIAS CERTIFICAÇÕES QUE A NANIAM POSSUI	9
FIGURA 10 - FAN-OUT COM EXEMPLO DE UM CHIP TERMINADO (À ESQUERDA) FAN-IN COM EXEMPLO DE UM CHIP ACABADO (À DIREITA)	10
FIGURA 11 - WAFER DE SILÍCIO PARA CORTAR E FAZER PICK-AND-PLACE À ESQUERDA. 3 ESTÁGIOS DO PROCESSO DE MOLD: RESPECTIVAMENTE DISPENSING, MOLD, E DEBOND	12
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE REDISTRIBUIÇÃO	13
FIGURA 13 - ESQUEMA DO PROCESSO DE MOLD.....	15
FIGURA 14 - PROPRIEDADES DO SILÍCIO	17
FIGURA 15 - DIAGRAMA TTT GENERALIZADO PARA UMA RESINA EPOXI	19
FIGURA 16 - À ESQUERDA CICLO DE CURA DE UMA RESINA EPOXI; À DIREITA VARIAÇÃO DO VOLUME DURANTE O CICLO DE CURA.....	22
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE RESULTADOS DE UM DIE SHIFT. NA NANIAM ESTE É FEITO ACOMPANHAR-SE DE UMA FOLHA DE CÁLCULO COM NORMAS E VALORES DE TODAS AS POSIÇÕES E DESLOCAMENTOS.	26
FIGURA 18 - MODELO TRIDIMENSIONAL USADO EM ABACUS PARA SIMULAÇÃO. EM BAIXO PORMENOR DE CORTE TRANSVERSAL PARA VISUALIZAÇÃO O OVERMOLD	28
FIGURA 19 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO REALIZADA NO ABACUS COM TENSÕES NO LADO DO DIE COM LINHA “PATH”.....	29
FIGURA 20 - DESLOCAMENTOS DO MODELO COM DUAS VISTAS (EM BAIXO O LADO COM DIE EXPOSTO E EM CIMA O LADO COM O OVERMOLD)	30

FIGURA 21 - GRÁFICO DE TENSÃO AO LONGO DO "PATH"	32
FIGURA 22 - DISPERSÃO EM % DO DESVIO DE CADA DIE NA WAFER DE CONTROLO	34
FIGURA 23 - DISPERSÃO EM % DO DESVIO DE CADA DIE NA WAFER T1.....	34
FIGURA 24 - DISPERSÃO EM % DO DESVIO DE CADA DIE NA WAFER T2.....	35
FIGURA 25 - INSTALAÇÕES DO CEMUC (COIMBRA) E DISPOSITIVO DE RAIOS LASER COM O ALVO A CERCA DE 6M	39
FIGURA 26 - DISPOSITIVO DE RAIOS LASER COM PORMENOR DA LENTE	40
FIGURA 27 - ESQUEMA DE UM FEIXE DE RAIOS LASER PARA MEDIÇÃO DE CURVATURAS	41
FIGURA 28 - SUPORTE METÁLICO (AL) PARA COLOCAÇÃO DE CHAPAS A MEDIR	43
FIGURA 28 - FOLHA DE CÁLCULO TÍPICA PARA O ENSAIO DE RAIOS LASER NO CEMUC.	45
FIGURA 30 - EXTENSÓMETROS TIPO DA HBM	48
FIGURA 31 - MONTAGEM DE CIRCUITO PARA UTILIZAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS	50

6. Índice de tabelas

TABELA 1 - RESULTADOS DO DIE SHIFT REALIZADO NA NANUM	34
TABELA 2 - TENSÃO MEDIDA POR RAIO LASER COM COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO E ESPESSURAS DE FILMES PRODUZIDOS. (\bar{x} - VALOR MÉDIO DOS 5 ENSAIOS)	44

7. Abreviaturas, acrónimos e notações

IC	Integrated circuit
PCB	Printed circuit board
CTE	Coeficiente de expansão térmica
ISO	International Standards Organization
OHSAS	Occupational Health and Safety Management Systems
ISO/TS	ISO Technical Specification
eWLB	Embedded Wafer Level Ball Grid Array
BGA	Ball Grid Array
EMC	Epoxi mold compound
FEA	Finite element analysis

1. Introdução

Um circuito integrado (do inglês *integrated circuit*, IC), também denominado semicondutor, é um componente da eletrónica (microeletrónica) como surge na figura 1. Estes dispositivos estão presentes nos mais diversos setores citando-se, como exemplo, os eletrodomésticos, equipamentos de medicina e da indústria automóvel, e ainda computadores e telemóveis [1].

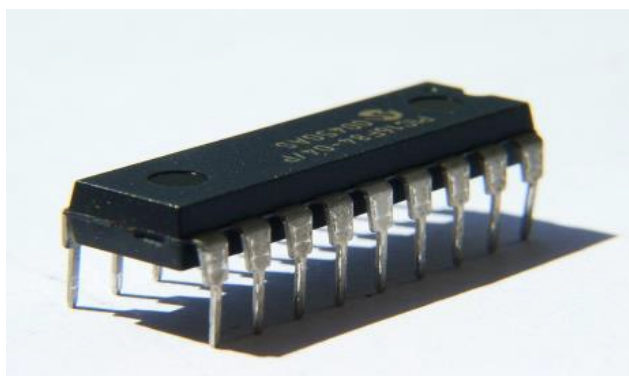


Figura 1 - Exemplo de um circuito integrado

A importância destes pequenos componentes no mundo actual, pode ser inferida pela receita que o seu mercado apresenta, onde, somente na América do Norte, excede os 400 mil milhões de dólares anuais [2, 3].

A indústria dos ICs vive com base numa máxima: mais pequeno, mais rápido e mais barato. Tem vindo a seguir a Lei de Moore que impõe que, com o mesmo custo de produção, o número de transístores num determinado *chip*¹ duplica a cada 18 meses como se mostra na figura 2. O que implica que o tamanho de cada transístor nele inserido diminui para metade a cada ano e meio [1, 4 - 7].

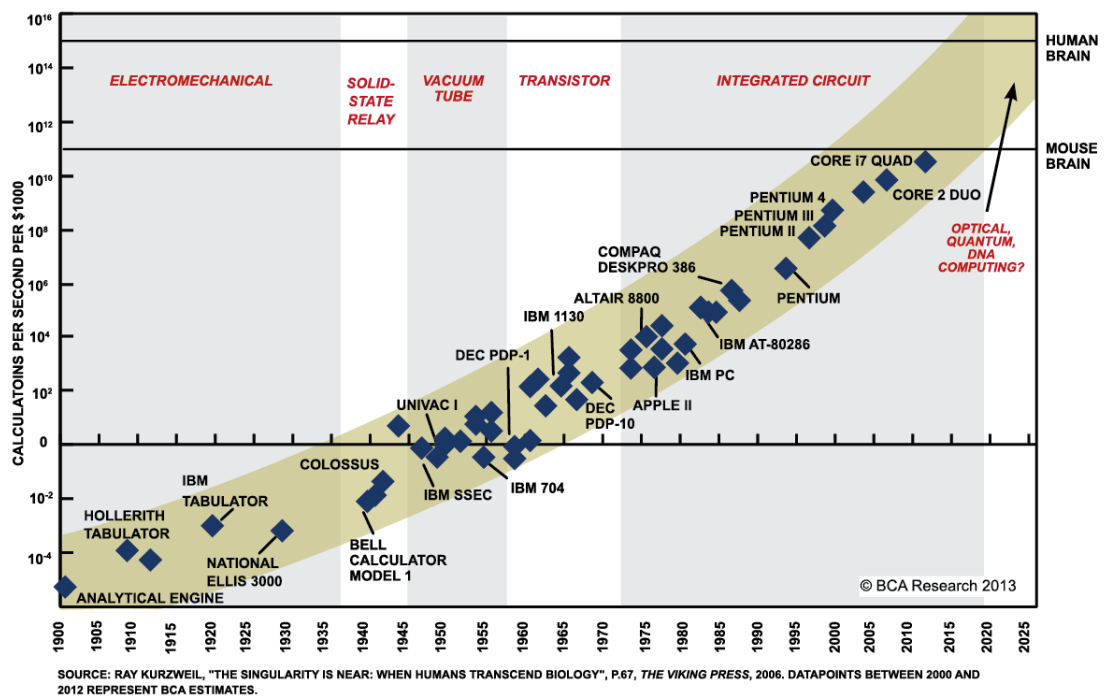


Figura 2 - Evolução dos transístores e suas capacidades.

Diminuir o tamanho de um elemento/componente possibilita o aumento da densidade de processamento - mais capacidade por unidade de área ou volume. Desse modo a miniaturização é algo muito desejado e a força motriz para qualquer empresa do ramo da eletrónica [7].

¹ Chip é um aglomerado de componentes eletrónicos - transístores - que juntos conseguem realizar operações aritméticas simples.

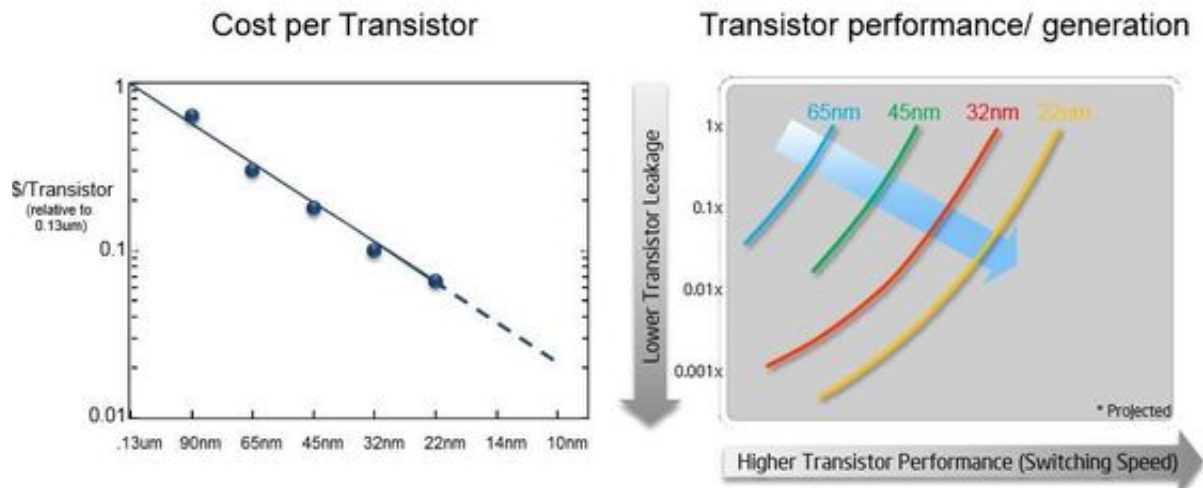


Figura 3 - Custo por unidade de processador e velocidade em função do tamanho

Com o constante desenvolvimento das tecnologias - que baixam constantemente o custo de produção (ver figura 3) - em adição à competitividade do mercado, o preço de venda de um determinado chip pode cair 50% no espaço de meses [7]. Este fator impõe, nos fabricantes, uma constante pressão para a inovação e melhoria proativa, tendo como norte a constante diminuição dos encargos de produção e aumento de confiança dos clientes [4, 5]. Considerando estas circunstâncias é possível compreender que os cuidados no fabrico destes elementos são um alicerce para a garantia da subsistência de qualquer empresa nesta ciência. Desse modo, os ICs são fabricados em salas denominadas “cleanroom” (ver figura 4). As cleanroom têm o papel de reduzirem a quantidade de partículas presentes na fase de produção. Com isto pretende-se que a produção seja feita sem agentes estranhos à mesma, evitando assim defeitos de vários níveis. São utilizados filtros no sistema de ar para controlar a quantidade de partículas existentes, em cada sala. Para que o controlo seja eficaz os trabalhadores usam vestuário específico (que evita que os próprios libertem partículas, vide figura 4), passam por diferentes câmaras de aspiração antes de entrar para cada sala, e todo e qualquer material que entra na zona fabril é controlado e aspirado. Ao longo da unidade fabril existem salas com diferentes graus de partículas por unidade de volume de acordo com a fase de processamento do IC [1, 6].



Figura 4 - Cleanroom e operários com fato próprio

O processo de manufatura dos ICs lida com elementos de dimensão muito reduzida e qualquer desvio pode ser crítico. Este facto impõe uma definição de defeito, para esta indústria, extremamente exigente - qualquer pequeno desvio, por insignificante que pareça, poderá impedir o funcionamento do *chip* [1, 6].

Os ICs são fabricados em duas etapas principais: o *front-end* e o *back-end*. Eles são fabricados em *wafers*² de silício, como se explica na figura 5, de modo que, em cada etapa, processam-se múltiplos ICs.

² Na microelectrónica, uma wafer (ou bolacha) é uma fina fatia redonda de material semiconductor (Silício por exemplo), na qual microcircuitos são construídos, em grande número. São uma importante chave para a construção de ICs.

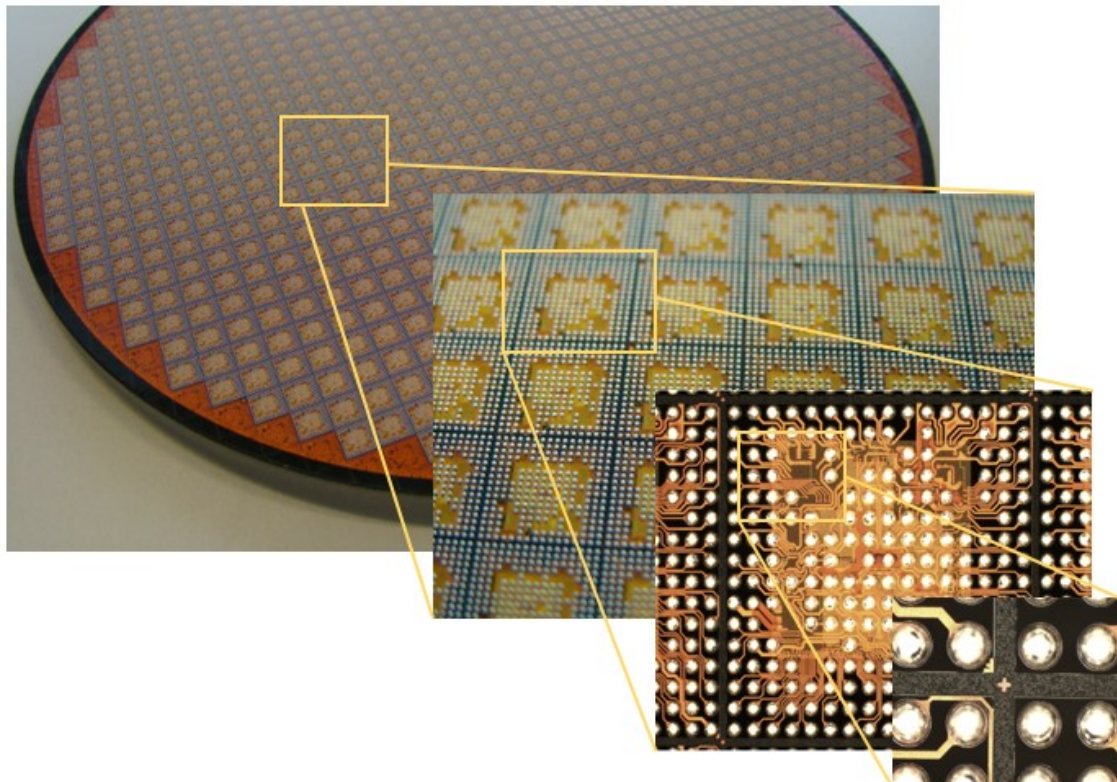
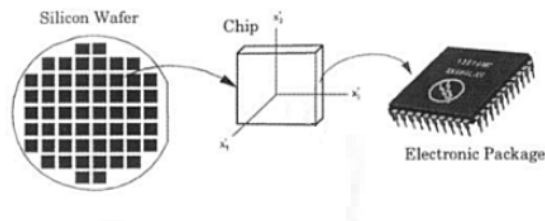


Figura 5 - Estados do IC ao longo do ciclo de produção (em cima); imagem de uma wafer eWLB tipo. Com ampliação sobre um die. E posteriormente para as bolas de solda nos ball pads (em baixo)

Nesta indústria, à semelhança de todas as outras, as técnicas de processamento levam à criação de tensões residuais. Com a crescente necessidade de miniaturização, este fenómeno, que em indústrias que fabricam componentes de maiores dimensões poderia ser menos prejudicial, nesta tem cada vez mais peso e é cada vez mais prejudicial. Por esta razão e devido a problemas ao nível nanométrico o crescimento de acordo com a Lei de Moore, nos dias de hoje, começa a estar em causa na indústria dos ICs [8 - 10, 14].

Um defeito, que deriva das tensões residuais, muito comum na indústria dos ICs, é o empenamento das *wafers*. Este defeito tem explicação nos diferentes coeficientes de expansão térmica (ou CTE, do inglês *coefficient of thermal expansion*) e na contração química (perda de água e criação de ligações mais fortes e mais pequenas entre as moléculas) do polímero usado no processo.

Neste trabalho pretende-se estudar a magnitude das tensões residuais que estão em jogo no começo do processo de *back-end* (último estágio da produção) dos ICs, na etapa de *mold wafer*. Aqui os *dies* de Si são embebidos em resina *epoxi* e o processo é feito a temperatura elevada.

O defeito em causa é extremamente prejudicial na tecnologia usada na Nanium (tecnologia *fan-out*), pois todo o *back-end* é feito sobre a *wafer* reconstruída, e só no fim se procede ao corte da *wafer* em ICs, contudo estas tensões libertam-se após esse mesmo corte e levam a problemas variados. Na tecnologia *fan-in* o problema é menos importante pois todo o *back-end* se realiza sobre uma *wafer* de Si e só no fim se executa o encapsulamento (embeber em EMC - do inglês “*epoxy mold compound*”).

Neste trabalho foram produzidas *wafers* especiais, para realizar ensaios mecânicos, e serem reproduzidos os ciclos térmicos com a acoplação de extensómetros nas faces dos *dies*, com intuito detetar deformações e tentar extrapolar as tensões que aí estarão instaladas. O trabalho iniciou-se com uma simulação por elementos finitos em Abacus, das tensões expectáveis. De destacar a análise de tensões usando um ensaio de medição de curvatura de uma chapa por raio laser, realizado nas instalações do CEMUC - Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

2. Nanium

O nome da empresa está intimamente ligado ao mercado em que se insere e ao que produz. O prefixo “nano” tem origem no grego e refere-se a objetos de pequena dimensão. O sufixo “ium” é um sufixo comum no latim para tudo aquilo que se refere a termos científicos nomeadamente elementos químicos, ou nomes de espécies. O símbolo da empresa (na figura 6) simboliza uma estrutura atómica que pretende representar a unificação entre os vários recursos. O nome e identidade da Nanium fazem alusão aos seus produtos, filosofia e visão.



Figura 6 - Logótipo da Nanium

A Nanium é uma empresa independente, que presta serviços de montagem e engenharia para Wafer-Level Packaging (WLP), e de encapsulamento, montagem, e teste no mercado de semicondutores. Iniciou-se na indústria dos semicondutores como Siemens em 1996. Três anos mais tarde, em 1999, tornou-se independente, como Infineon Technologies, focando-se no mercado das memórias. Em 2006 tornou-se Qimonda, entidade legal separada da Infineon. E finalmente, em 2010, surgiu a Nanium.



Figura 7 - Nanium desde a sua génese até aos dias de hoje

Com mais de 500 colaboradores, instalações e equipamentos de ponta, e fazendo jus aos seus 19 anos de experiência na indústria de semicondutores

(representados na figura 7), a Nanium oferece os melhores produtos e serviços. Possui escritórios de vendas em Dresden, Alemanha, e Boston, EUA, com negócios por toda a Ásia, Europa e América do Norte.

Localiza-se em Vila do Conde, no litoral norte de Portugal, sendo que as suas instalações, que podem ser observadas na figura 8, representam um investimento acumulado superior a um bilião de euros. Ocupa uma área total de 155.000 m², com uma área total de sala limpa de 20.600 m². As instalações de produção incluem laboratórios de alta tecnologia e salas limpas de classificação de 1K (ISO 6), 10K (ISO 7) e 100K (ISO 8).



Figura 8 - Instalações da Nanium, Vila do Conde

A Nanium possui ainda certificações nas áreas de gestão da qualidade (logótipos visíveis na figura 9), pela ISO 9001, sistemas de controlo de qualidade ambiental, pela ISO 14001 e OHSAS 18001. Está ainda certificada de acordo com a ISO/TS 16949 pois alguns dos seus clientes pertencem à indústria automóvel.



3. Processo eWLB

O encapsulamento avançado desempenha um papel principal no encaminhamento da diminuição da potência, custo e dimensões nos produtos de performance melhorada. [15]

O fabrico de um IC é composto por duas partes principais: o *front-end* e o *back-end*. A produção inicia-se no *front-end* onde se produzem *wafers* de silício monocristalino, pelo método de Czochralski. Há criação de estruturas diretamente na *wafer* (estruturas em alumínio tais como, díodos, transístores, condensadores, entre outros) e as *wafers* produzidas são enviadas para o *back-end*.

No *back-end* é feito o encapsulamento, ou *packing*, e individualização dos ICs. Como primeira instância temos a escolha da tecnologia de empacotamento: *fan-in* ou *fan-out*. Estas duas tecnologias distinguem-se logo nas primeiras etapas do *back-end* e podem ser vistas algumas das suas diferenças na figura 10 [16]. A tecnologia *fan-in* é muitas vezes intitulada de FI-WLP (de *Fan-In Wafer Level Package*) ao passo que a *fan-out* é chamada de FO-WLP (de *Fan-Out Wafer Level Package*).

Na tecnologia *fan-out* o *package* não é realizado diretamente sobre a *wafer*, mas sobre uma *wafer* reconstruída a partir dos *dies* da *wafer* original, proveniente do *front-end*. O *die* é envolvido por um polímero (EMC), e os *chips* obtidos são estruturalmente semelhantes aos *packages* convencionais BGAs³ (*Ball Grid Array*), daí esta técnica ser muitas vezes denominada de *Embedded Wafer Level Ball Grid Array* (eWLB). Este tipo de *packaging* permite a obtenção de *chips* de menor espessura e com uma maior área superficial o que aumenta a quantidade de I/O (*Inputs/Outputs*) do *chip*.

³ Tipo de *package* de montagem na superfície usado para ICs

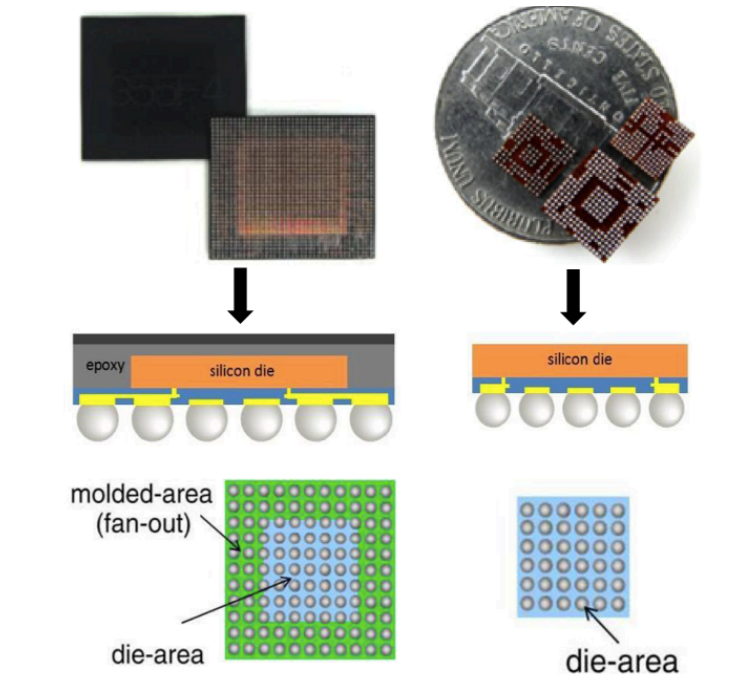


Figura 10 - Fan-Out com exemplo de um chip terminado (à esquerda) Fan-In com exemplo de um chip acabado (à direita)

A tecnologia *fan-in* é caracterizada pelo tamanho final do *chip* ser igual ao tamanho do próprio *die* sendo assim o tipo de *package* que assegura o mínimo tamanho possível de chip.

Em comparação, o eWLB possibilita ligações para o exterior (interconnects) em maior número - visto ter mais área para os colocar por ser *fan-out*, necessita de um passo de reconstrução da *wafer* que abranda a velocidade de produção mas permite uma maior flexibilidade para o número de pinos (que está intimamente ligado a capacidade de um chip [11]). Possui também um Yield⁴ melhor que o Fi-WLP. [15,17]

⁴ É definido como o número de unidades que sai de um processo dividido pelo número de unidades que entram nesse mesmo processo num determinado período de tempo. Só unidades totalmente boas, sem *rework*, são contabilizadas como saídas de um processo individual.

Como na Nanium praticamente só se produz *package fan-out*, o processo que se segue é todo voltado para esta tecnologia de *package* microeletrónico.

O processo inicia-se por uma individualização da *wafer* de silício (corte denominado “*dicing*”) proveniente do *front-end*. A *wafer* é então cortada em pequenos cubos (*dies*) que depois são dispostos com afastamento entre si (chamado de “*pitch*”) num *mold carrier*⁵ para o seu empacotamento ou em inglês “*packing*”. No *mold carrier* os *dies* são embebidos numa resina *epoxi* deixando apenas uma face do *die* por cobrir - a face ativa - onde se encontram os circuitos e estruturas eléctricas. A partir desta etapa a *wafer* produzida é denominada de *wafer* reconstruída (também apelidada de “*Recon wafer*”). Nos passos seguintes são depositadas e reveladas camadas dieléctricas fotossensíveis seguidas de camadas de *seed layer* (titânio e cobre), as camadas fotossensíveis têm função revelar uma máscara pretendida. Posteriormente são realizados vários revestimentos para a proteger e ao mesmo tempo trazer as ligações para fora do *die* para se ligarem às bolas de solda.

O empacotamento do IC é imperativo para permitir que este funcione em ambientes severos, e assegurar que mudanças de condições do ambiente não afectarão o seu correto funcionamento. A proteção realizada, além de proteger e isolar os ICs também auxilia no suporte mecânico de toda a estrutura [3].

A tecnologia *eWLB (fan-out)* é separada em quatro secções distintas: reconstituição, redistribuição, ligação de bolas de solda e individualização e teste. Segue-se uma breve discriminação dos principais passos de cada uma das secções do processo (ver anexo 1 para discriminação mais detalhada passo a passo do processo *eWLB*) [18].

⁵ O *mold carrier* é uma espécie de prato metálico (aço inox) que serve de suporte mecânico para os *dies* para o processo de *mold*. Os *dies* são colados ao *mold carrier* por meio de uma tape de dupla face.

<p><u>1.Reconstituição e moldação:</u></p>	<p><u>Pick-and-place</u>: posicionamento e colocação dos dies na sua posição numa <i>tape</i> de dupla face (a rosa na figura 11)</p> <p><u>Moldação</u>: embutimento dos dies em mold compound e posterior cura do mesmo</p>
--	---

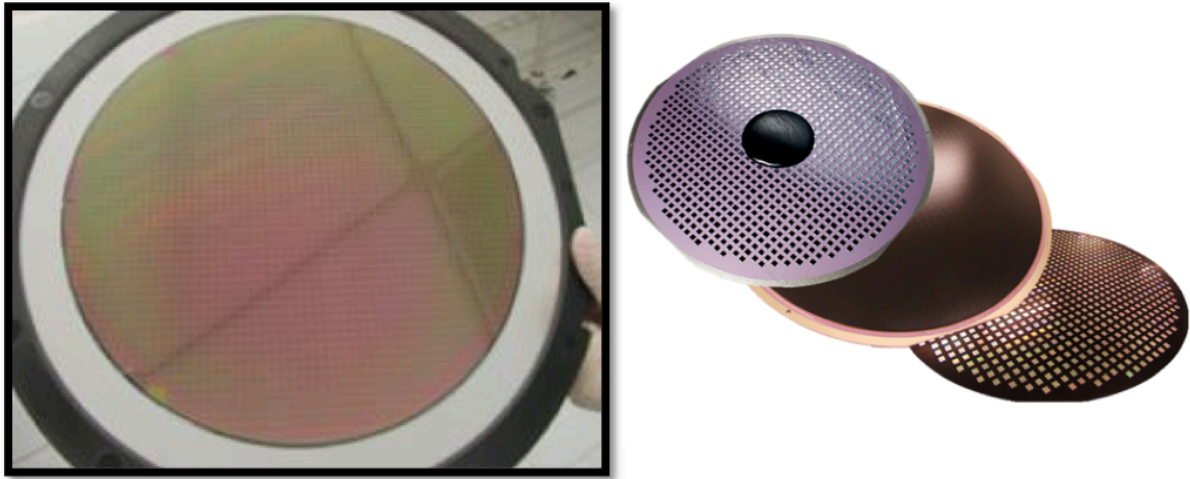


Figura 11 - Wafer de Silício para cortar e fazer *pick-and-place* à esquerda. 3 estágios do processo de mold: respectivamente *dispensing*, *mold*, e *Debond*

Na figura 11 podemos observar os vários estados que o produto apresenta antes de se obter a *wafer* reconstruída propriamente dita. Até termos *wafer* reconstruída há 4 etapas: cortar a *wafer* de Si em pedaços (*dies*), realocá-los com uma distância determinada (*pitch*), fazer a moldação, e descolar a *wafer* do *mold carrier* a que está colada para ter um suporte mecânico para a moldação.

É este processo de moldação que provoca as primeiras tensões residuais que acompanharão a *wafer* ao longo de todo o processo de fabrico, e que trazem dificuldades nos processos seguintes.

<u>2.Redistribuição:</u>	<u>Spin coating:</u> deposição de material foto resistente
	<u>Litografia:</u> definição de áreas para os caminhos eléctricos
	<u>Deposição por pulverização catódica:</u> depósito do <i>seed layer</i>
	<u>Eletrodeposição do cobre:</u> definição das traces (Lito traces) e áreas de contacto onde são colocadas as bolas de solda

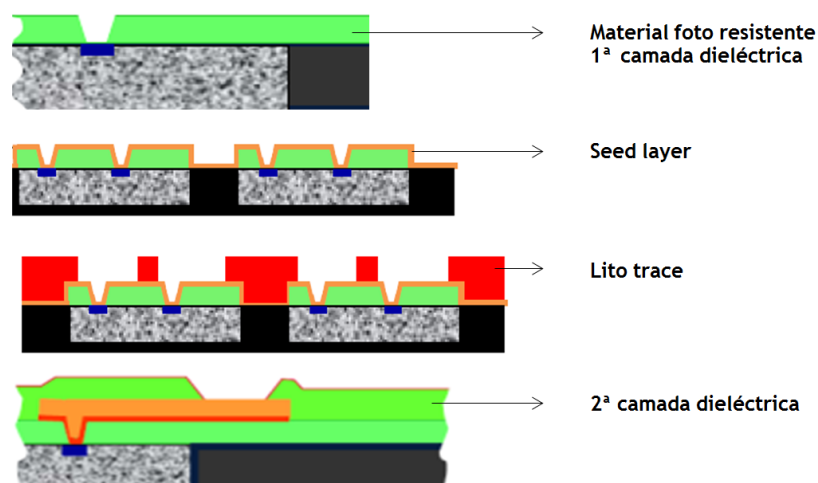


Figura 12 - Representação esquemática do processo de redistribuição

Aqui é feito todo o processo de revestimento e proteção da face que não possui molde (face ativa e com ligações eléctricas). Na figura 12 podemos ver a quantidade de passos necessários para produzir uma proteção capaz mas que ao mesmo tempo produz uma ligação com contacto eléctrico estável e suficiente. Neste caso há duas camadas dieléctricas mas há possibilidade de se realizarem mais conforme necessário para trazer todas as ligações para o exterior para se ligarem às bolas de solda.

<u>3.Ligação das bolas de solda:</u>	Acoplação das bolas de solda aos contactos de cobre
--------------------------------------	---

As bolas são acopladas num processo chamado “*Solder Ball Attach*” ou SBA, que se inicia pelo depósito de um fluxo aos *ball pads*⁶ das wafers. Este fluxo tem objetivo de ligar, por soldadura, as bolas de ao *ball pad*. As bolas são então lançadas sobre a wafer, e irão fixar-se nos ball pads já que estes são côncavos. De seguida é realizado um tratamento térmico chamado “*Reflow*”. Neste tratamento o efeito conjugado da temperatura com o fluxo produzem uma solda eficaz para ligação das bolas.

<u>4.Individualização:</u>	Individualização dos chips da wafer reconstruída Testes de fiabilidade e desempenho
----------------------------	--

Nesta etapa procede-se ao corte da wafer em chips individuais, e depois são feitos testes de desempenho. Estes testes, para verificar a sanidade do produto acabado de realizar e seus contactos elétricos, realizam avaliações por *drop test* (teste de número de quedas livres que suporta), resistência a ciclos térmicos, e sensibilidade à humidade.

3.1 Moldação/Mold Wafer

No processo de *mold wafer* é feito o encapsulamento dos dies ou chips de Si, provenientes do *front-end*, numa resina *epoxi*, que se denomina *mold compound*

⁶ Locais predestinados para as bolas se alocarem

(EMC). Este processo situa-se no começo do processo de *back-end* e tem por isso uma repercussão sobre todos os processos que o precedem.

3.1.1 Descrição do processo

O processo de molde é constituído por algumas etapas que passam desde o doseamento da resina até à medição do empeno da wafer reconstruída (acabada de produzir). O doseamento é realizado como se evidencia na figura 13, no centro do *mold carrier* e com uma forma de uma bolha e a partir daí pressionado.

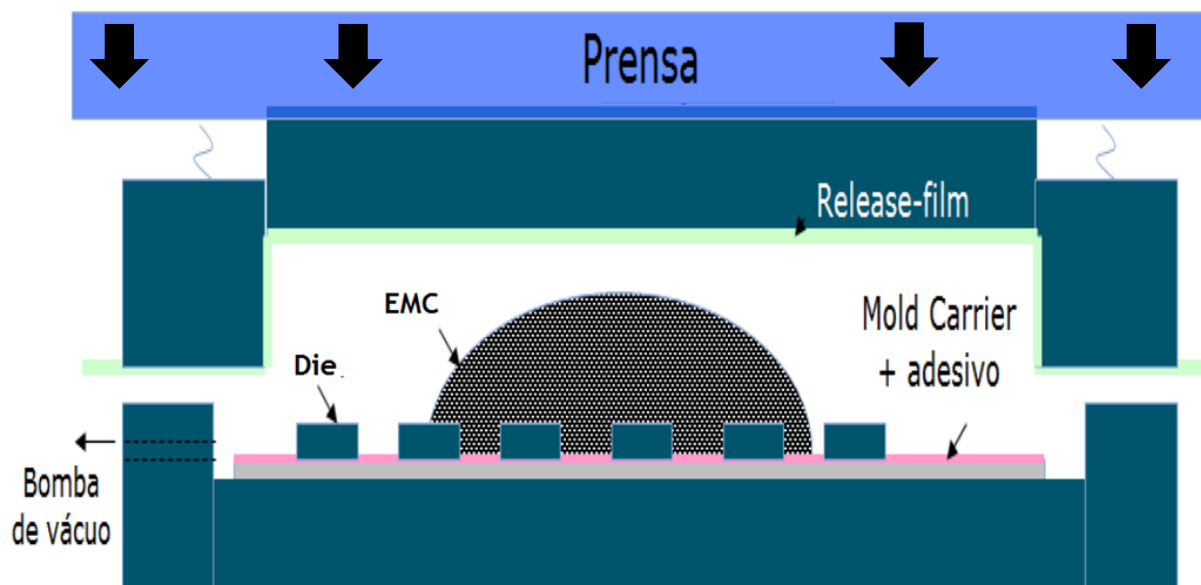


Figura 13 - Esquema do processo de *mold*

O mold compound é uma resina, líquida à temperatura ambiente que, pela ação de calor e pressão, é feita solidificar. Durante este processo (ver figura 13), a temperatura e a pressão visam a polimerização e o espalhamento da resina.

A prensa empurra o EMC sobre os dies, e como o espalhamento se quer o mais uniforme possível e sem quaisquer gases presentes no ou introduzidos no material, é feito vácuo na parte oposta à prensa [19].

Por norma, na Nanium, todos os produtos são realizados com *overmold*. Deste modo há mais facilidade no manuseio e menos limitações nos processos seguintes. O termo *overmold* refere-se à quantidade de EMC que cobre o lado não ativo do *die*. Ou seja, neste passo cobrem-se os dies com molde em excesso, pelo que fica

uma camada remanescente por cima dos mesmos, uma vez que o diâmetro é fixado pela parte inferior da prensa. Este excesso pode ser retirado por um processo denominado “*grinding*”. No *grinding* a *wafer* é atacada por partículas abrasivas que vão retirando molde até à espessura requerida.

Um dos benefícios deste tipo de encapsulamento é que o mold compound não toca na superfície da prensa, pois esta está protegida por uma “*realease-tape*” - uma fita adesiva que protege a superfície da prensa. Realizado em vácuo, sem aberturas ou zonas de junta, este processo não cria desperdício e, apesar de se descartar a *tape* a cada moldação, o custo que está subjacente a esta *tape* descartável, perde significado quando se prescinde de limpar ou tratar a superfície da prensa [19].

O ciclo térmico imposto, juntamente com as condições existentes de vácuo e pressão, criam tensões internas, detectáveis ou não a olho nu. Estas, para poderem ser controladas devem ser devidamente estudadas. No *mold wafer*, é feita a montagem de materiais com diferentes propriedades: um metal, Si, e um polímero, EMC.

Estas diferenças produzem por si só tensões durante o arrefecimento, e aumentam a complexidade do processamento e a probabilidade de falha do IC podendo impossibilitar o processamento e manuseio nos passos seguintes do *back-end*.

3.1.2 Materiais no package: Silício

Para os dies é usado um material semiconductor: o silício. Descoberto em 1824 o silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre. Tem duas formas de existência à temperatura ambiente: amorfo e cristalino. Os cristais do silício cristalino podem ser feitos crescer através de um processo conhecido por Czochralski - através deste processo são fabricadas as wafers monocristalinas para o *front-end*. Estes cristais quando dopados com elementos como boro, gálio, germânio, fósforo, ou arsénio, são denominados de semicondutores pois tanto

podem ser condutores como isoladores (operações booleanas). São por isso usados na manufatura de dispositivos eletrônicos de estado sólido (*solid-state*⁷) como transístores, células solares e *microchips*. Na figura 14 podemos observar algumas características deste elemento primordial na indústria de semicondutores [20,21]. No anexo 2 temos mais algumas propriedades desta resina.

Material Property	Value
Density (g/m ³):	2.328
Melting point (°C)	1420
Young Modulus (GPa):	131
Kc (MPa.m ^{1/2}):	0.9
Shear Modulus (GPa):	79.9
Poisson's Ratio (ν):	0.266
Hardness Vickers Hv (kg/mm ²):	1000

Figura 14 - Propriedades do Silício

3.1.3 Materiais no package: resina epoxi

O *mold compound* é o material plástico termoendurecível frequentemente usado. Os plásticos termoendurecíveis, como o EMC, contêm polímeros que se ligam entre si para formar ligações químicas irreversíveis - ligações cruzadas. As ligações cruzadas, eliminam o risco de o produto se voltar a fundir quando lhe é aplicado calor. Assim, estes plásticos são ideais para aplicações onde há aquecimentos a altas temperaturas como na eletrónica [22]. Podemos as principais características da resina na tabela 1.

⁷ Os dispositivos electrónicos solid-state são dispositivos onde a corrente está confinada a elementos e compostos sólidos de engenharia especificamente para a amplificar. São exemplos desses dispositivos os ICs, LEDs e LCDs.

Tabela 1 - Principais características do EMC.

Parâmetro	
T °C armazenamento	-40
Prazo validade a -40°C	9 Meses
Prazo validade a -20°C	3 Meses
Tempo de estabilização mínimo	4h
Temperatura de estabilização	Ambiente
Tempo de utilização após estabilização	12h
Possível recongelar?	Sim, apenas uma vez

3.1.4 Cura

A cura do EMC é feita com temperatura, e em várias etapas, inicialmente é feita a moldação deste para a forma desejada (a cerca de 120 °C) e posteriormente uma cura de 60 minutos a 150°C. Após esta cura o *mold* está com resistencia mecânica suficiente para poder ser manuseado e servir de suporte mecânico para os proximos prassos de produção dos ICs. Os passos seguintes incluem curas a temperatura mais alta (175 °C) para garantir que o *mold compound* é completamente curado. Se a temperatura $T_{g\infty}$, que se encontra na parte superior do diagrama TTT da figura 15 [23,24], for ultrapassada em grande quantidade ou se se permanecer acima dela por tempo suficiente poder-se-á chegar a zona de carbonização (*char region* na figura 15), onde a resina queima.

Na zona de cura infinita as propriedades mecânicas da resina são ideias - dureza e resistência. É uma zona do diagrama TTT apartir da qual não há melhoria nas propriedades da resina mesmo que se eleve a resina a temperaturas superiores. Na verdade a partir desta temperatura e tempo observa-se uma degradação

progressiva nas propriedades da resina com o aumento da temperatura e tempo acima de $T_{g\infty}$ [24].

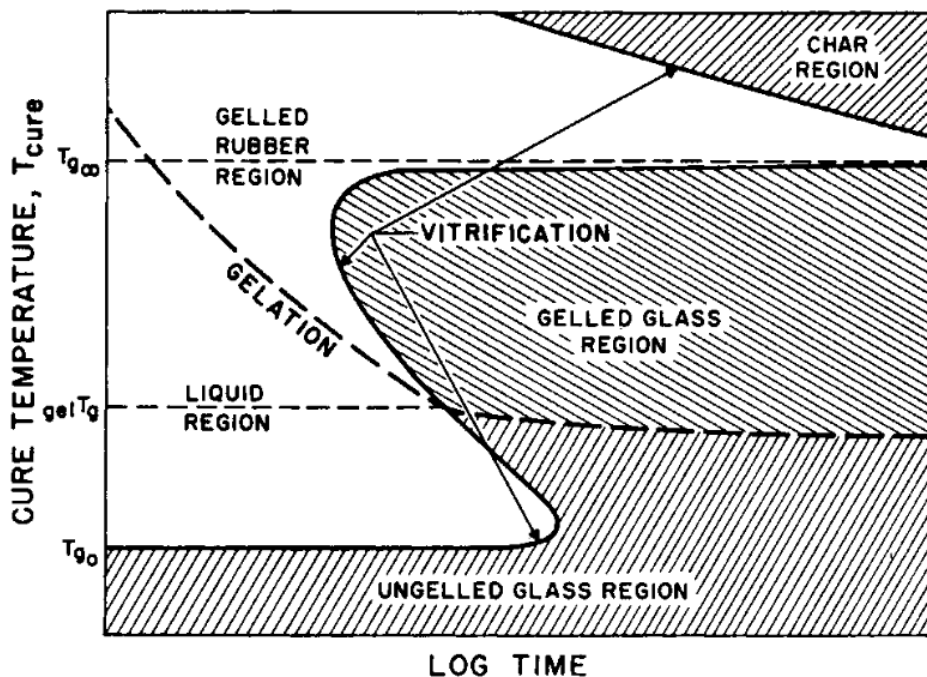


Figura 15 - Diagrama TTT generalizado para uma resina epoxi

4. Contração/expansão

Os materiais alteram as suas dimensões quando aquecidos ou arrefecidos. Isto ocorre porque o aumento da temperatura leva a um aumento da vibração dos átomos que constituem uma determinada estrutura. Estando estes átomos, com a elevação da temperatura, num estado de vibração superior, existe uma maior repulsão entre si e por conseguinte a sua distância média altera-se, tendendo a aumentar levando à expansão (dilatação) do material [25].

A contração/expansão de uma matriz polimérica pode ter duas origens: térmica ou química, mas em ambos os casos está associada a transferência de calor. Durante a cura as variações dimensionais são resultado do somatório da

contribuição química e térmica. Contudo, a forte ligação da contração química à expansão térmica leva a que o cálculo da mesma seja complicado de realizar [22].

4.1 CTE, coeficiente de expansão térmica

A expansão de cada material é estudada para determinação de coeficientes de expansão térmica (α). Este coeficiente descreve o quanto, por cada aumento de um grau de temperatura, um material expande [26, 27, 28, 29]. Tem unidade de K^{-1} , e é normalmente referenciado em ppm/ K (ou $10^{-6}/ K$): partes por milhão por grau Kelvin [26, 27]. Pode ser calculado através de alguns ensaios, nomeadamente dilatometria, DSC (do inglês, “*Differential scanning calorimetry*”), interferometria, ou ensaios termomecânicos [27].

O CTE é uma propriedade importante para engenheiros de projeto e *design*, pois permite calcular, *à priori*, a dilatação que poderá ocorrer num componente, encaixe ou ligação. Com esta dilatação é possível prever se, devido a um determinado gradiente térmico, poderão ocorrer incongruências, falhas, ou rotura por tensões térmicas [28]. É portanto, um parâmetro que define as tensões residuais num componente e sua distorção durante arrefecimento [29]. Convém frisar que o CTE não é sempre constante em todas as direções (no caso de o material não ser isotrópico) da matriz atômica. Nos PCBs (do inglês “*Printed circuit board*”), por exemplo, os valores são diferentes no plano da placa (X,Y) e através da sua espessura (Z) [26].

Conhecendo o CTE, é possível de imediato calcular as variações dimensionais que se poderão instalar a partir de um gradiente de temperaturas para um dado comprimento. Como descreve a equação:

$$\alpha = \frac{dl}{l \times dT}$$

Onde dl é a variação dimensional do material; l é o comprimento total do material; dT é o gradiente de temperatura a que este está exposto [26, 28].

A magnitude do CTE depende da estrutura do material. Quanto mais forte forem as ligações desta, menos um material expande devido à temperatura. Este fenómeno é evidenciado para materiais com baixa energia de ligação pois, nesses casos, os átomos têm mais liberdade para se movimentarem (aumentarem a distância entre si). Por conseguinte, materiais cerâmicos com alta energia de ligação, têm CTEs baixos quando comparados com metais e polímeros, e, nestes últimos, os termoplásticos e elastómeros têm CTEs mais altos [26].

O CTE deve ser referenciado ou a uma determinada temperatura ou a uma média de um dado intervalo de temperaturas. A variação do CTE com a temperatura é uma função suave se o material não sofrer nenhuma mudança de fase ou estado. Por exemplo para os termoendurecíveis há um marcado aumento de CTE acima da temperatura de transição vítrea (T_g) [27].

Na montagem realizada há um gradiente do CTE entre o Si e o EMC de, respectivamente, 2,6 ppm/ °K para 7,3 ppm/ °K. Deste modo, a resina irá contrair mais do que o silício, sendo que esta o rodeia por todos os lados menos um. Durante o arrefecimento do sistema resina-silício iremos assistir a uma instalação de tensões de compressão nos dies, por parte do EMC.

4.2 Contração química

A contração química (ou chemical shrinkage) refere-se à quantidade de água presente na matriz do polímero que, com a cura, se liberta. A contração responsável resulta da diminuição do volume e é proporcional à quantidade de água, pois quanto mais água libertada maior diminuição de volume [22]. A contração química efetiva é superior à aparente. Na figura 16 podemos observar o ciclo de cura típico de uma resina epoxi, e constatar que na realidade durante o aquecimento observa-se uma expansão da matriz ao mesmo tempo que se liberta água com as respetivas alterações de volume. Isto porque a quantidade de água libertada não compensa a dilatação atómica devida à elevação da temperatura [22,30,31].

Até hoje as técnicas de medição da contração química (nomeadamente de dilatometria) só conseguem aproximações do valor real da contração química. De facto o *shrinkage* consegue-se medir ou calcular, por comparação após arrefecimento, ainda que com alguma margem de erro. A metodologia é simples e implica por uma amostra curada e uma por curar em paralelo e comparar dados recolhidos no aquecimento ou arrefecimento [23].

De acordo com Yasir et al. [22] aumentando a pressão durante a cura consegue-se uma diminuição na contração química [23,31].

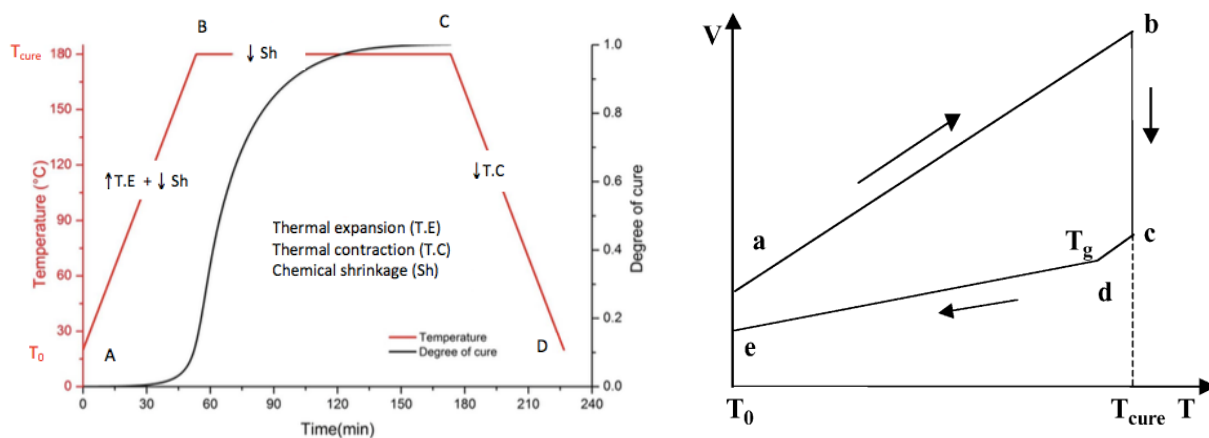


Figura 16 - À esquerda ciclo de cura de uma resina epoxi; à direita variação do volume durante o ciclo de cura.

5. Tensão

O conceito de tensão teve origem no estudo da resistência e falha dos sólidos. Um campo de tensões corresponde à distribuição de tensões internas que contrabalançam um determinado conjunto de tensões externas [9]. É usado para expressar o carregamento, em termos de força, aplicado a uma determinada área de secção transversal de um objecto [10].

A tensão corresponde à força ou sistema de forças aplicadas que tendem a deformar um corpo. Da perspectiva do que ocorre no material, a tensão é a distribuição interna de forças, dentro de um corpo, que contrabalança e reage a cargas que lhe são aplicadas. A distribuição de tensões pode ser ou não uniforme, dependendo da natureza da carga. Por exemplo, uma barra carregada puramente em tração vai ter essencialmente uma distribuição uniforme de tensões de tração. Contudo, uma barra carregada em flexão vai ter um campo de tensões que varia com a distância perpendicular ao eixo normal [10,12,13].

Para muitos cálculos de engenharia e determinação de propriedades de materiais a tensão é representada de um modo simplificado como um vector. Como o “vector” é uma grandeza com magnitude (norma), direcção e ponto de aplicação, este permite descrever com clareza de forma simplificada uma tensão aplicada.

5.1 Tensões Residuais

São tensões residuais aquelas que, independentemente da presença de cargas externas, estão presentes e alojadas na estrutura de materiais e podem ter origem química, térmica ou mecânica ou derivarem de uma transformação. Em casos de ligações podem aparecer devido a diferenças de CTE, limite elástico, ou dureza dos materiais ligados [32,33]. Isto porque em gradientes térmicos ou solicitações mecânicas os materiais ligados irão ter comportamentos diferentes conduzindo a tensões.

As tensões residuais podem, por vezes, chegar a ultrapassar a tensão limite de elasticidade do material. Estas são responsáveis pela diminuição significativa no

tempo de vida de um componente e caso tenham condições para tal podem progredir durante o tempo de serviço do componente [11,34]. É por isso muito importante estudar as tensões envolvidas neste processo que deriva dos diferentes CTEs entre os materiais envolvidos, e a contração química da resina usada.

Com as técnicas analíticas e computacionais mais recentes é possível estimar as tensões ou campos de tensões existentes num componente. Porém, isto não é suficiente para prever a performance do mesmo.

Um estudo realizado [33], mostra que um EMC com baixo módulo elástico, associado a baixo CTE e baixo Tg pode minimizar a tensão térmica num *die*.

Apesar das tensões residuais poderem ter diferentes origens, elas são resultado de discordâncias. Estas discordâncias podem ser entre componentes, fases, ou regiões no mesmo componente. A seleção de métodos apropriados para medição destas tensões depende da escala à qual estas atuam [32].

O ensaio de difração de raios-X (DRX) é um dos métodos não destrutivos que, no caso de o material a medir ser cristalino, pode ser utilizado [37]. Este método mede a diferença dos picos de difração e permite calcular a deformação da matriz cristalina. Além deste ensaio poder-se-á usar um ensaio de ultrassons em instrumento apropriado que mede a diferença de velocidade de propagação de ondas sonoras através do material. Esta velocidade é dependente de tensões que se possam encontrar no material.

Existem alguns métodos destrutivos de medição destas tensões, e todas têm um princípio: provocar o relaxamento das mesmas e analisar os resultados que daí advêm. Nestes métodos o que varia é a forma como se procede ao relaxamento e como se mede a deformação. Podem enumerar-se métodos como: o método da curvatura (que irá ser explorado mais à frente) [1, 38], o método de contorno [34,39], o método de Speckle [34,40], método de concordância (do inglês *compliance*) [14, 34], e o método do furo [34,41].

6. *Die shift*

O *die shift* está associado à movimentação dos dies no *mold carrier* durante o processo de mold. Esta movimentação pode ser medida ao longo do ciclo de produção da wafer e permite visualizar, através de diagramas de vectores, com rapidez e exatidão o deslocamento dos dies ao longo de toda a área da wafer.

Como referido na secção do mold wafer, durante este processo a prensa realiza pressão sobre a resina. Com isso cria-se um efeito de pressão de fluido a atuar na superfície lateral e superior dos dies que pode causar o arrastamento destes - chamado de “*Die Shifting*”. Este fenómeno leva a que o *die* tenha mais arrastamento quanto mais distante do centro da *wafer* estiver. Contudo este efeito não é proporcional em todas as direcções. [19].

Em suma o Die Shift é um ensaio que produz um mapeamento do arrastamento dos *dies* no *mold carrier* durante o *mold* (como se descreve na figura 17). Este arrastamento é proporcional à força realizada em toda a área da superfície lateral do *die* e portanto poderá trazer alguns resultados interessantes para o estudo em causa.

Esta movimentação pode ser minimizada com uma *tape* de dupla face com um adesivo mais forte mas esta alteração trará problemas ao processo de *detape*.

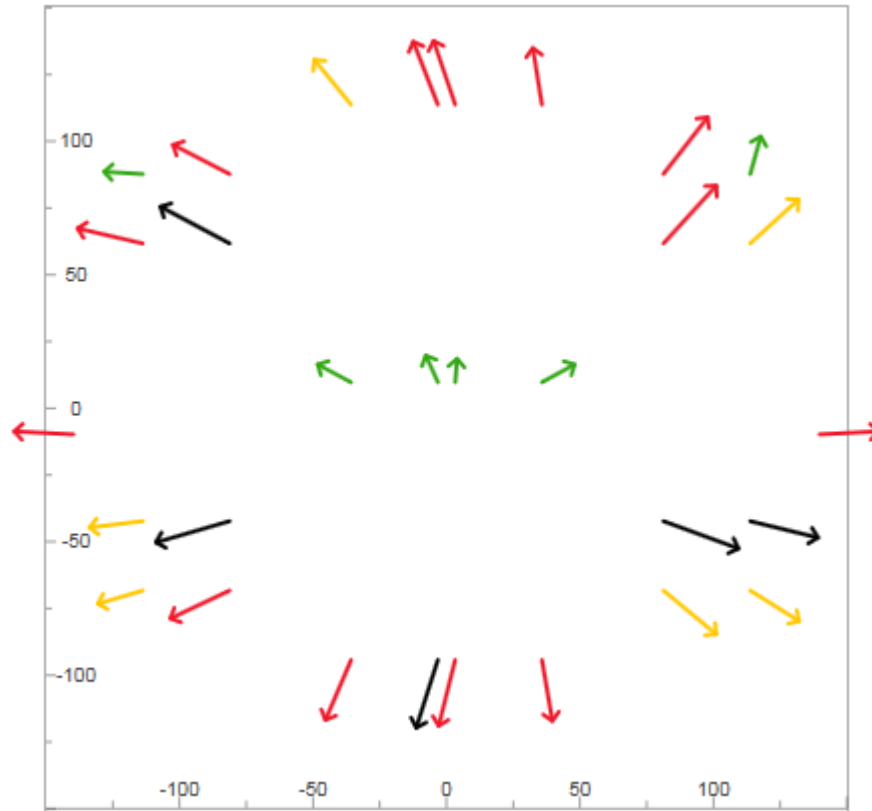


Figura 17 - Diagrama de resultados de um Die Shift. Na Nanium este é feito acompanhar-se de uma folha de cálculo com normas e valores de todas as posições e deslocamentos.

7. Trabalho realizado

Para se poderem medir tensões residuais em qualquer sistema ou material é necessário que haja um método que as consiga observar e mensurar, ou um método de as libertar e medir posteriormente as deformações que estas provocam

7.1 Análise de elementos finitos (FEA)

A análise de elementos finitos (FEA em inglês) é um método numérico que resolve equações diferenciais de uma estrutura complexa. Inicia a análise por transformar uma superfície numa malha complexa com um número de regiões não uniformes (elementos finitos) que estão ligadas por nós [42].

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura ou forma, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, material constituinte e ações aplicadas. O modo como o problema é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. O Abaqus é um dos *softwares* comerciais de análise de elementos finitos mais conhecidos no mundo [42].

7.1.1 Simulação

Realizou-se um pequeno estudo no software Abacus. Este estudo baseou-se no arrefecimento de um modelo desde a temperatura de cura (150°C) até à temperatura ambiente (25 °C) com uma velocidade de arrefecimento equiparada à de um arrefecimento livre. O sistema simplificado de uma wafer foi um *package* (Die + Mold Compound). As dimensões podem ser observadas na figura 18. O modelo foi construído considerando que em 1 (na figura 18) as características do silício monocristalino (*die*) e em 2 (na figura 18) as características do EMC. Deste modo foi possível realizar uma simulação do arrefecimento e analisar os campos de tensões que se instalariam segundo as leis de arrefecimento, condutividade e restrições dimensionais do modelo.

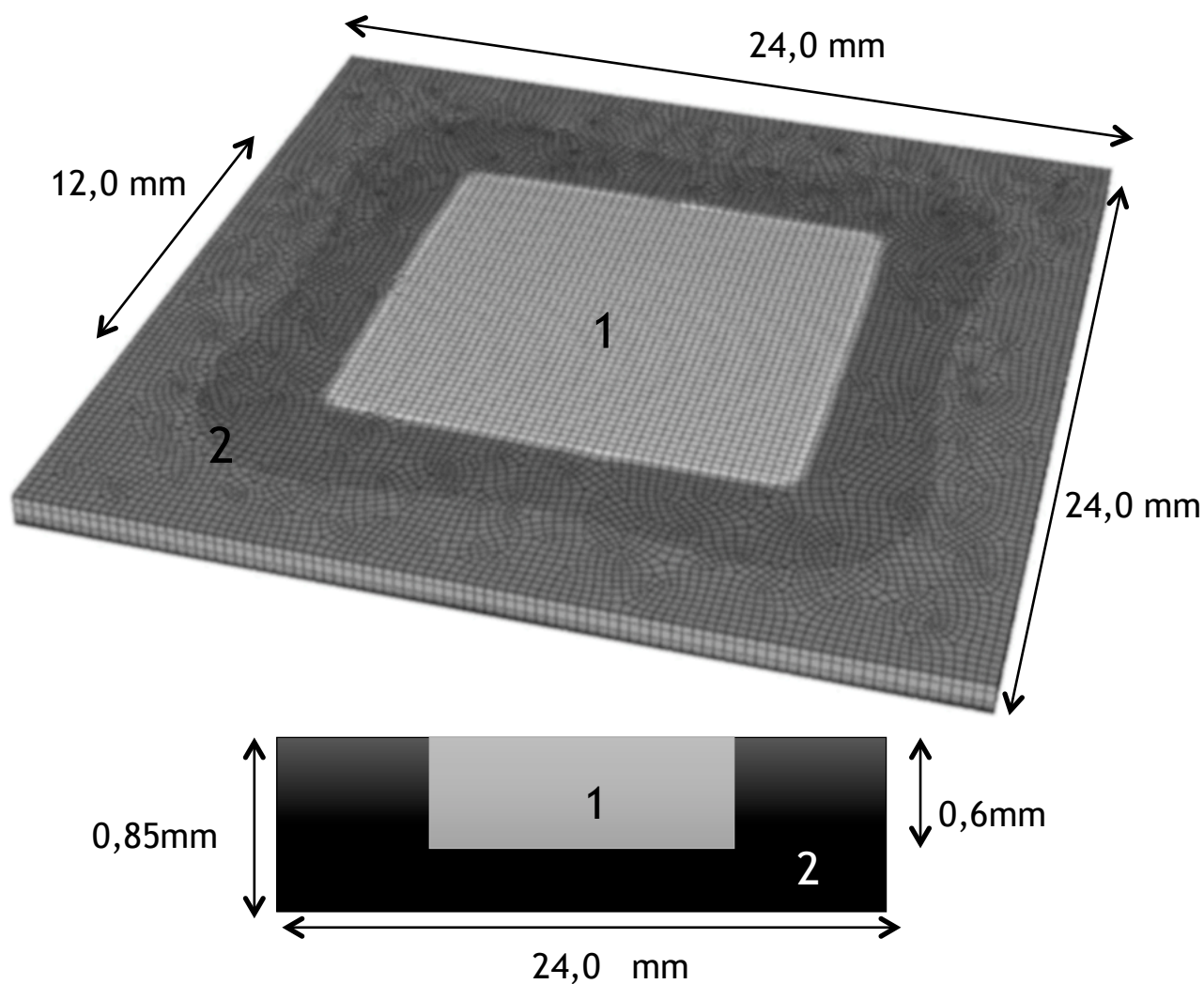


Figura 18 - Modelo tridimensional usado em ABACUS para simulação. Em baixo pormenor de corte transversal para visualização o *overmold*

Na parte inferior da figura 18 pode observar se um corte transversal feito ao modelo (em esquema) para se visualizar o *overmold*. Este modelo foi idealizado considerando as dimensões das wafers produzidas as quais serão analisadas mais a frente neste trabalho.

Desta simulação conseguiu-se a aproximação do valor das tensões a nível absoluto. As restrições impostas a nível dimensional foram as seguintes:

- Material 1 - restringido em todas as direções menos na superior.
- Material 2 - restringido em xy e livre em z.

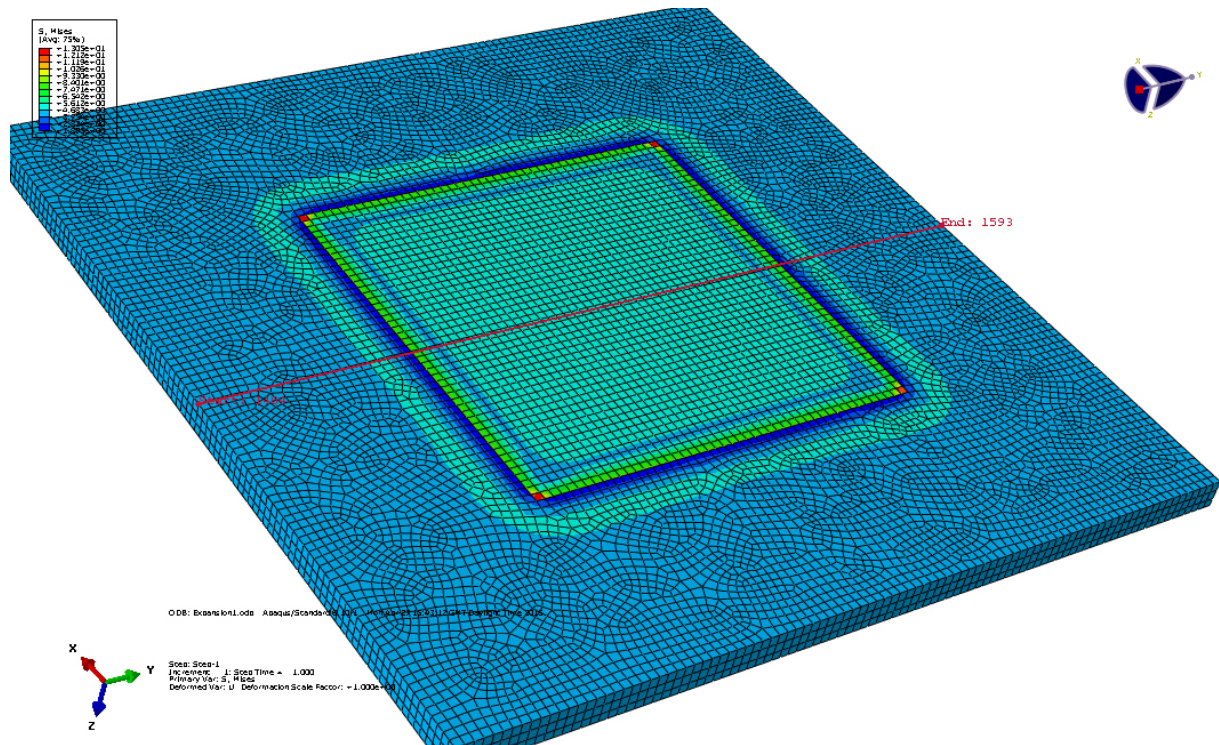


Figura 19 - Resultado da simulação realizada no Abacus com tensões no lado do *die* com linha “*path*”

Na figura 19 podemos ver as tensões que se instalam no modelo a partir das condições dadas. O código de cores transmite as zonas com maior tensão a vermelho e zonas com menor tensão a azul. Podemos ver que as zonas com maior tensão são ao longo das arestas laterais do *die*, e as zonas de menor tensão são já no EMC, imediatamente após a interface. Foi traçada uma linha transversal denominada de “*path*” no Abacus. A partir desta linha, podemos pedir ao software para desenhar gráficos de tensão ou deslocamento em função da distância percorrida ao longo da mesma. Este foi o método usado para determinar a tensão máxima no caso em estudo.

7.1.2 Deslocamentos

Fazendo uma pequena análise do deslocamento que tem papel neste processo. Em seguida temos o deslocamento superior e inferior do modelo (figura 20). Podemos observar que o deslocamento é muito maior na parte superior do modelo (lado com *die* exposto). Esta parte superior do modelo corresponde à parte do *die* exposto.

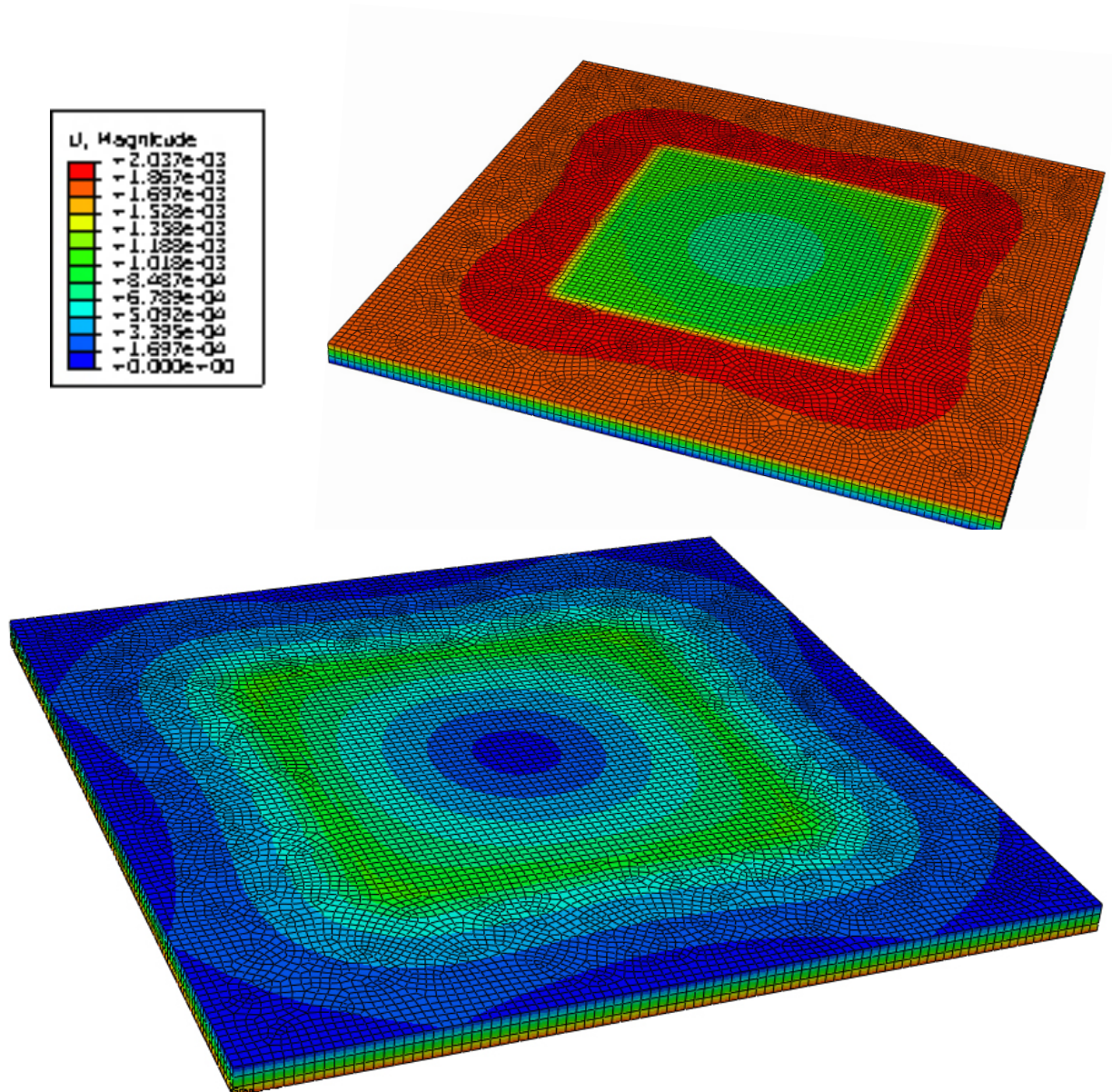


Figura 20 - Deslocamentos do modelo com duas vistas (em baixo o lado com *die* exposto e em cima o lado com o *overmold*)

Com o auxílio do código de cores podemos ver de que forma se dão os deslocamentos no arrefecimento de ambas as imagens do modelo. Porém não foi possível visualizar o efeito no plano médio do modelo mas prespectiva-se que seja uma zona de transição entre os dois lados do modelo.

De salientar que na imagem de baixo (lado com Si) se observa muito pouco deslocamento na zona mais periférica do modelo e no seu centro, e que este se faz notar mais a meio das duas zonas. No centro quase não teremos deslocamento uma vez que aí, só temos Si que, além de contrair pouco, ao o fazer não realiza propriamente deslocamento. O deslocamento faz-se notar com a distância ao centro pois, como era de esperar, a cada partícula que contrai temos a sua vizinha (mais próxima do centro) que também já contraiu e por isso o deslocamento aumenta do centro para a periferia. Porém a uma determinada distancia o efeito faz-se desvanecer. Não foram descobertas razões para tal, mas pensa-se que as restrições impostas na simulação poderão desenvolver aqui algum papel pois a contração específica do EMC deveria ser suficiente para realizar mais deslocamento.

Na parte de cima podemos observar que o deslocamento é superior na periferia, como de esperar, mas muito maior que o esperado em comparação com a imagem de baixo. No centro há um efeito semelhante ao da figura de baixo porém observa-se uma interface a partir do momento em que se entra no domínio onde o *die* se encontraria caso não houvesse *overmold*. Isto indica que o *die* poderá ter influência no deslocamento da fina camada de EMC (0,25mm como explica a figura 18) que tem por cima.

7.1.3 Tensão

De seguida será feita a análise dos gráficos de tensão ao longo da linha “*path*” traçada como acima referido. O parâmetro usado pelo software para análise da tensão é a tensão de Von Mises, amplamente usada nos softwares de simulação. O critério de Von Mises distingue-se do critério convencional de tensão máxima por usar a teoria da energia de distorção de um corpo para prever a falha do mesmo, ao passo que o critério de tensão máxima considera unicamente a tensão maxima

que o mesmo suporta, até à rotura em ensaios mecânicos. No fundo Von Mises é um critério integrado que avalia a tensão em casos de tensões complexas e não uniaxiais [43].

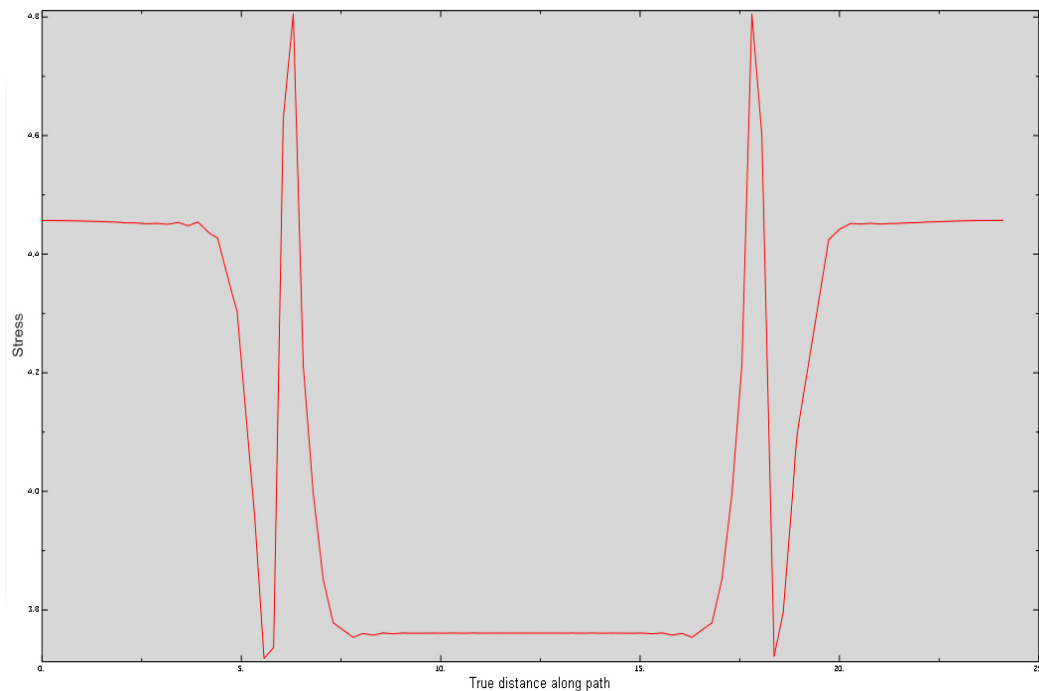


Figura 21 - Gráfico de tensão ao longo do "path"

No gráfico podemos observar a evolução da tensão ao longo do "path" e verificar o ponto de tensão máxima (~5 MPa) que se encontra a sensivelmente a 6 mm do início do path. Esta é a interface EMC/silício, conforme as medidas dadas na figura 21 que indicam que temos um *die* de 12 mm no centro de uma *package* de 24 mm, com 6 mm de EMC para cada lado. Como de esperar temos um efeito de espelho a meio do eixo dos xx pois o modelo é simétrico.

Podemos observar, na Figura 21 - Gráfico de tensão ao longo do "path", que temos a tensão a diminuir na zona mais próxima do Si (próximo dos 5 mm do início do path) a crescer num curto espaço e a ser máxima na interface (por volta dos 4,8 MPa, sensivelmente antes nos 6 mm) e a decrescer bruscamente depois da interface, sendo muito mais reduzida no centro (3,7 MPa).

7.2 Produção de wafers

Após a simulação procedeu-se à produção de algumas wafers com vista a realizar alguns ensaios para recolha de mais informação.

A produção de wafers foi realizada segundo os requisitos impostos na empresa. Foram criados documentos de pedido especial, e as wafers avançaram na linha de produção de acordo com a prioridade que detinham.

Foram produzidas 5 wafers, duas para ensaios mecânicos e outras três para um estudo específico da Nanium, onde pretendiam inferir o peso relativo do shrinkage na contração total do EMC.

7.2.1 Produção de 3 wafers com mold compound com diferentes níveis de cura.

A produção destas *wafers* foi feita com intuito de verificar o peso do shrinkage durante a arrefecimento do EMC. O CTE foi praticamente eliminado da equação colocando EMC já curado entre os *dies*. O EMC foi colocado em *pick-and-place* com dois diferentes graus de cura, juntamente com uma *wafer* de controlo com EMC totalmente por curar.

Produziu-se uma *wafer* com processo convencional e nos locais entre os *dies* foram colocados bocados de EMC (denominados *black dies*) previamente curados a 150 °C - T1. Realizou-se uma *wafer* exatamente igual mas com *black dies* curados a 150°C e posteriormente a 175 °C - T2. A *wafer* de teste como o próprio nome indica foi realizada segundo os processos normais e por isso todo o EMC colocado encontrava-se por curar.

De salientar que mesmo com os *black dies* as *wafers* necessitavam de algum EMC para ligar estes aos *dies*. Porém esta quantidade de EMC poder-se-ia ignorar para efeitos de análise pois era muitíssimo inferior ao tamanho dos *black dies* e dos *dies* em uso.

Realizou-se então o processo de *mold* e posteriormente a medição dos Die Shift. Os gráficos de todos os *shifts* realizados nas *wafers* de controlo, T1 e T2 encontram-se, respectivamente, nas figura 22, 23 e 24.

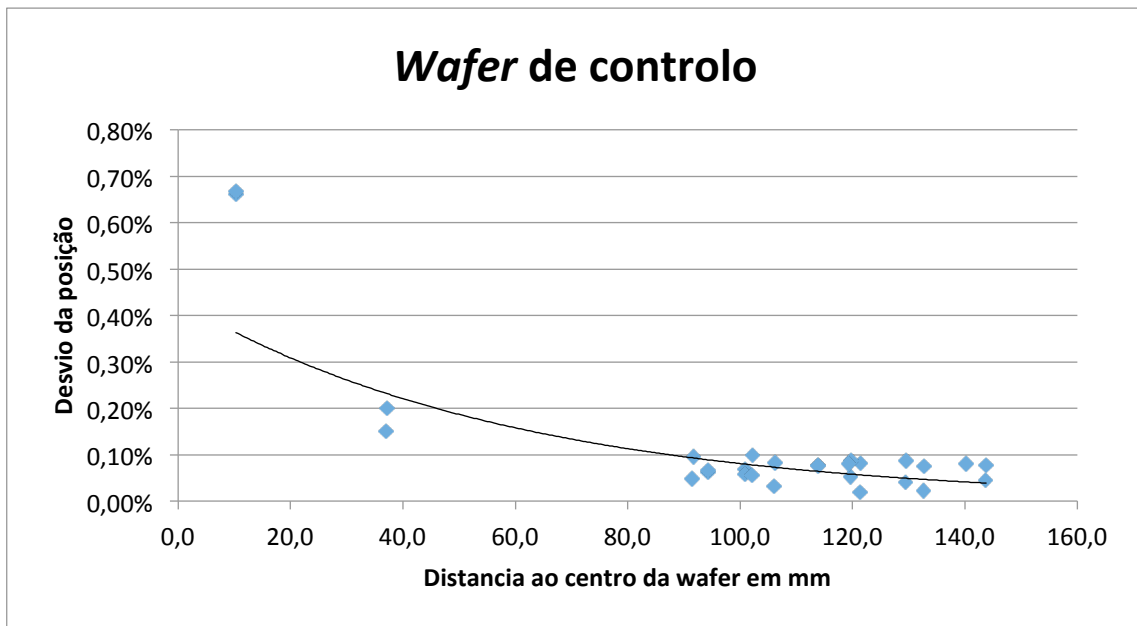


Figura 22 - dispersão em % do desvio de cada die na wafer de controlo

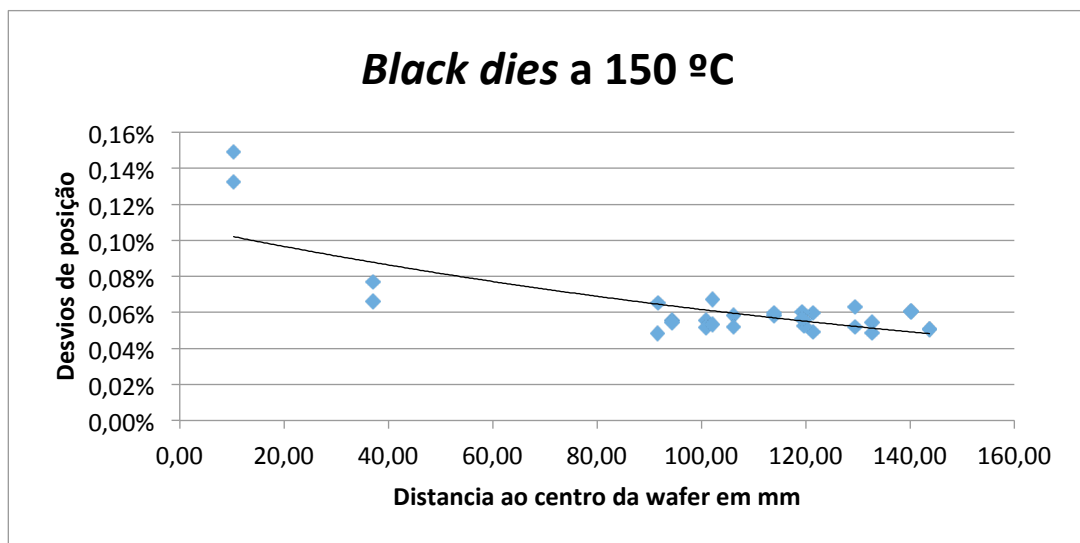


Figura 23 - dispersão em % do desvio de cada die na wafer T1

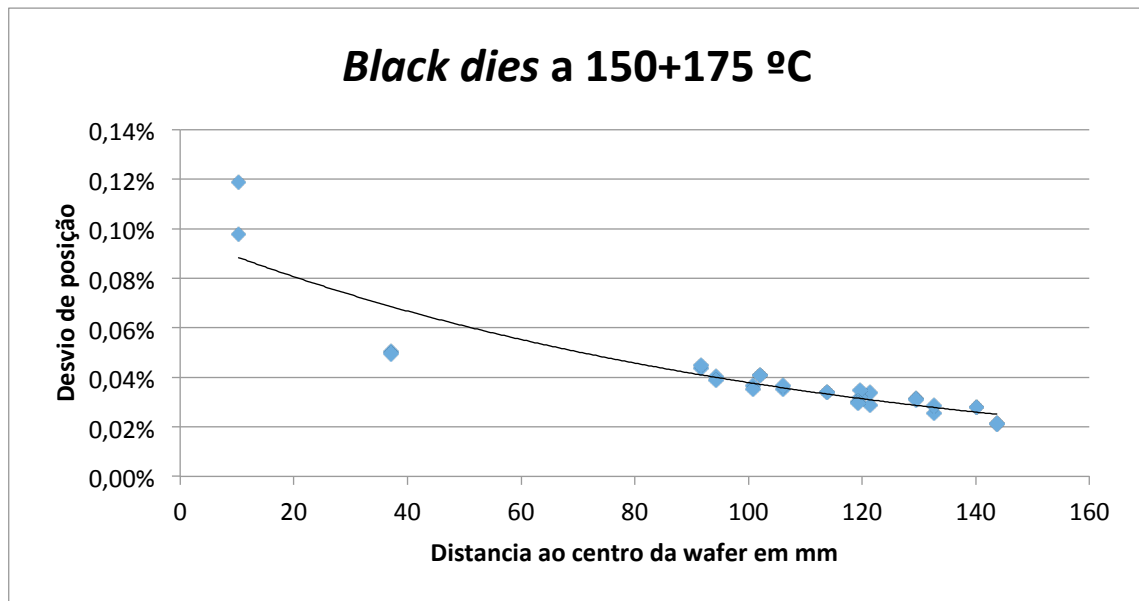


Figura 24 - dispersão em % do desvio de cada die na wafer T2

Tabela 2 - Resultados em ppm do Die Shift dos ensaios realizados na Nanium

	Controlo	T1	T2
Ppm	1200	600	400

Considerando, de modo um pouco grosseiro, que a *wafer* T2 não possui qualquer CTE, ou seja, que toda a contração devido a este fenómeno já ocorreu, podemos inferir o peso relativo do CTE comparando-o com a *wafer* de controlo. Na *wafer* de controlo a ocorrência de CTE + *Shrinkage*, e na T2 praticamente só *shrinkage*. É assim possível dizer que o *shrinkage* tem um peso considerável na contração total do EMC e comparável ao CTE já que o ensaio realizado demonstra que no caso de haver somente o *shrinkage* a atuar sobre os dies, estes sofrem um movimento, segundo os resultados da tabela 2, de cerca de 33% do que sofreriam com CTE + *Shrinkage*.

Poderá haver assim lugar para mais *shrinkage* nesta resina epoxi do que o que os estudos apontam. [44]

7.2.2 Produção de 2 wafers para ensaios e medições

Foram produzidas 2 *wafers* com as seguintes dimensões:

- Diâmetro de 300 mm;
- *Packages* de 24 x 24 x 0,85 mm;
- *Dies* de 12 x 12 x 0,6 mm;
- 1 delas cortadas (*dicing*) metade em tiras e outra metade em *packages*;

Estas *wafers* destinaram-se a ensaios mecânicos e térmicos a realizar para recolha de propriedades.

7.3 Análise de tensões pela equação de Stoney

A aplicação da equação de Stoney é possível ser realizada através de uma metodologia muito simples, e de fácil interpretação dos resultados - o desvio de um feixe de laser. Esta metodologia consegue dar dados para a equação de Stoney que se revela muito expedita para determinação de tensões em sistemas de baixos valores de tensão com pequenas deformações e curvaturas uniformes [45].

Com as propriedades do material e as dimensões geométricas de um sistema filme-substrato, a curvatura medida pode ser convertida em tensão do filme usando a equação de Stoney. Embora esta equação seja baseada em muitas suposições e tenha por isso a sua aplicabilidade constrangida, existem várias modificações e extensões a esta fórmula que a tornam mais abrangente e realística. Estas modificações têm em consideração efeitos como espessura do filme num substrato fino, grande deflexão, deformação plástica, tensão não isotrópica, gradiente de tensões, gradientes térmicos, dimensões da estrutura e espessura não uniforme entre outros.

7.3.1 Equação de Stoney

Esta equação foi inicialmente aplicada a filmes galvânicos. Tem sido amplamente usada desde então para prever tensões em filmes pela medida da curvatura do substrato. Na sua forma mais básica, a curvatura k é relacionada com

a força residual f no filme, causada por um mau depósito do filme ou por outras tensões elásticas pela seguinte equação:

$$\kappa = \frac{6 \cdot f}{E_s^* h_s^2}$$

onde $E_s^* = E_s / (1 - \nu_s)$ é o módulo de elasticidade biaxial do substrato e E_s , ν_s e h_s são, respetivamente, o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e a espessura do substrato.

A fórmula leva em conta várias suposições, porém é uma boa aproximação de uma tensão instalada pelo depósito de um filme num substrato.

A diferença de CTEs, entre o substrato e o filme, leva ao surgimento de tensões que resultam de forças de tração e compressão. Por norma o substrato, como tem CTE mais baixo que o filme, fica exposto a forças de compressão por parte do filme e este a forças de tração por parte do substrato que o tenta alongar. Se h_f for a espessura do filme, então a tensão do filme σ_f é como se segue:

$$\sigma_f = \frac{f}{h_f}$$

Da combinação destas duas equações temos, por fim, a equação de Stoney:

$$\sigma = \frac{E h_s^2}{6 h_f (1 - \nu_s)} \kappa$$

Esta equação resulta da análise de um modelo de um sistema filme-substrato e é baseada em diversas suposições que foram resumidas por Freund:

- a) as espessuras tanto do filme como do substrato são muito reduzidas quando comparadas com as outras duas dimensões;
- b) as espessuras dos filmes são significativamente mais pequenas que as espessuras dos substratos;
- c) o material do substrato é homogéneo, isotrópico, e responde elásticamente de forma linear;
- d) o material do filme é isotrópico;
- e) o efeito perto da periferia do substrato não é consequente, e todas as variáveis físicas são invariantes em qualquer posição num plano paralelo ao da interface;
- f) todos os componentes de tensão na direção da espessura difundem-se pelo material;
- g) as deformações e rotações são infinitesimais.

Existem várias modificações e extensões a esta equação que por entram em linha de conta, para os cálculos, com alguns parâmetros que introduzem variações na equação original, e que serão mais fáceis de aplicar a cada caso específico. Exemplos dessas modificações são as equações de Freund, Hsueh e Sühr.

7.3.2 Aplicação da equação de Stoney - desvio de raio laser

Foram utilizadas as instalações do CEMUC (Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra) para realização de ensaios de feixe laser. Nas figuras 25 e 26 podemos ver, na devida ordem, algumas imagens do dispositivo de feixe laser usado bem como as instalações do CEMUC, e o dispositivos de raio laser usado bem como a sua montagem.

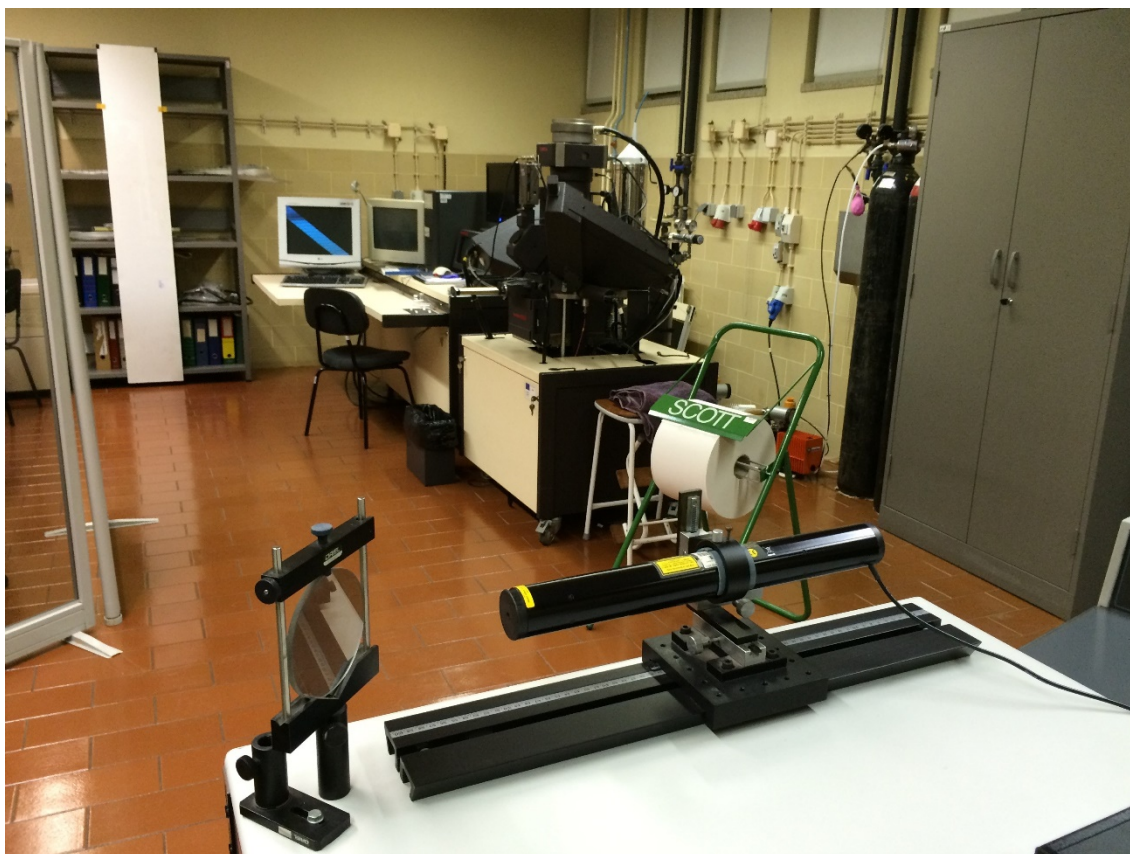


Figura 25 - Instalações do CEMUC (Coimbra) e dispositivo de raio laser com o alvo a cerca de 6m

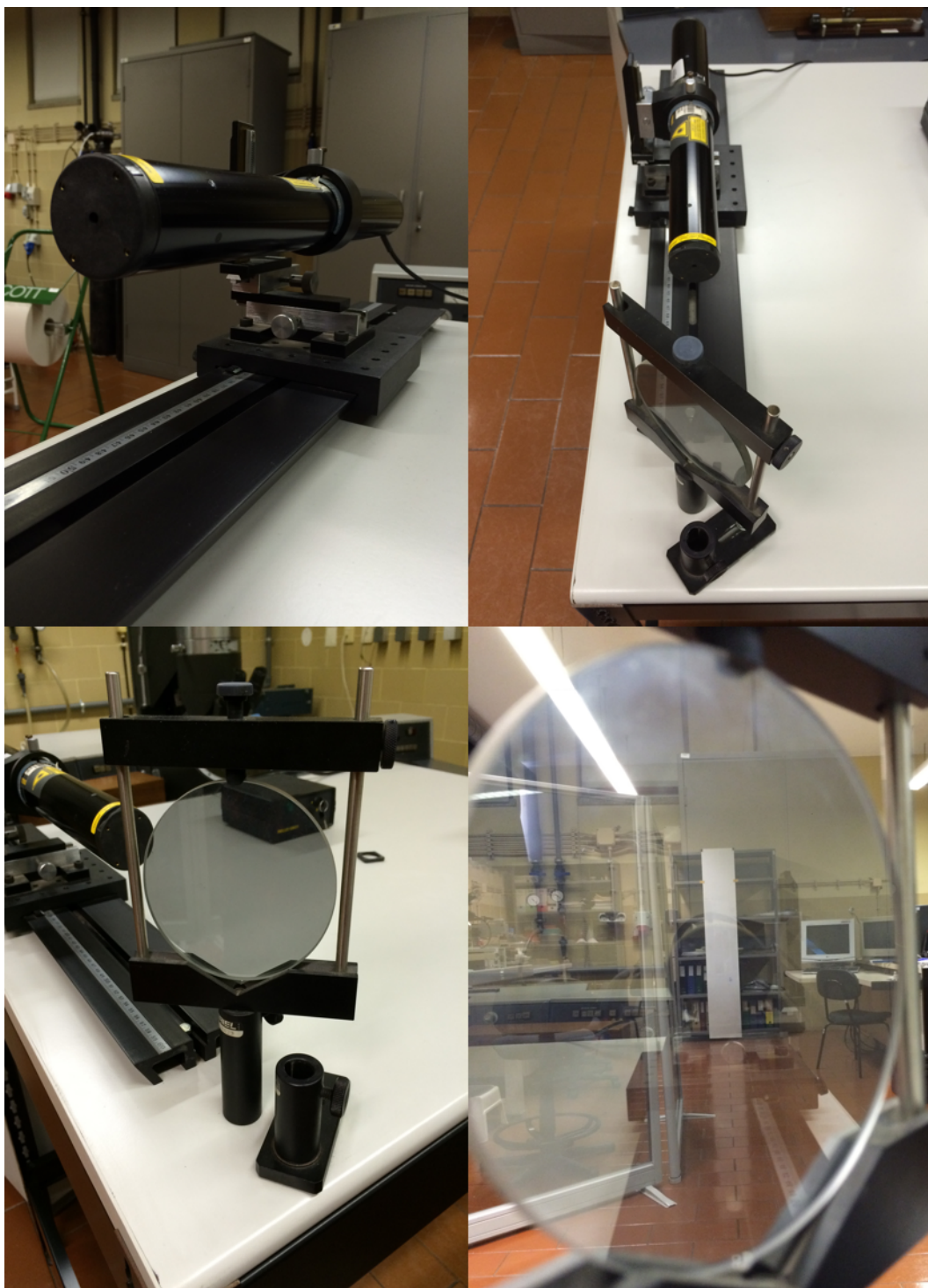


Figura 26 - Dispositivo de raio laser com pormenor da lente

O desvio de feixe laser é um sistema muito simples que se faz valer da utilização de uma lente ótica específica para medir pequenas curvaturas de uma amostra. Na figura 27 podemos ver um esquema deste método de medição de

curvaturas. Possuindo uma distância considerável entre a amostra e o alvo conseguimos a resolução que queremos para a medição.

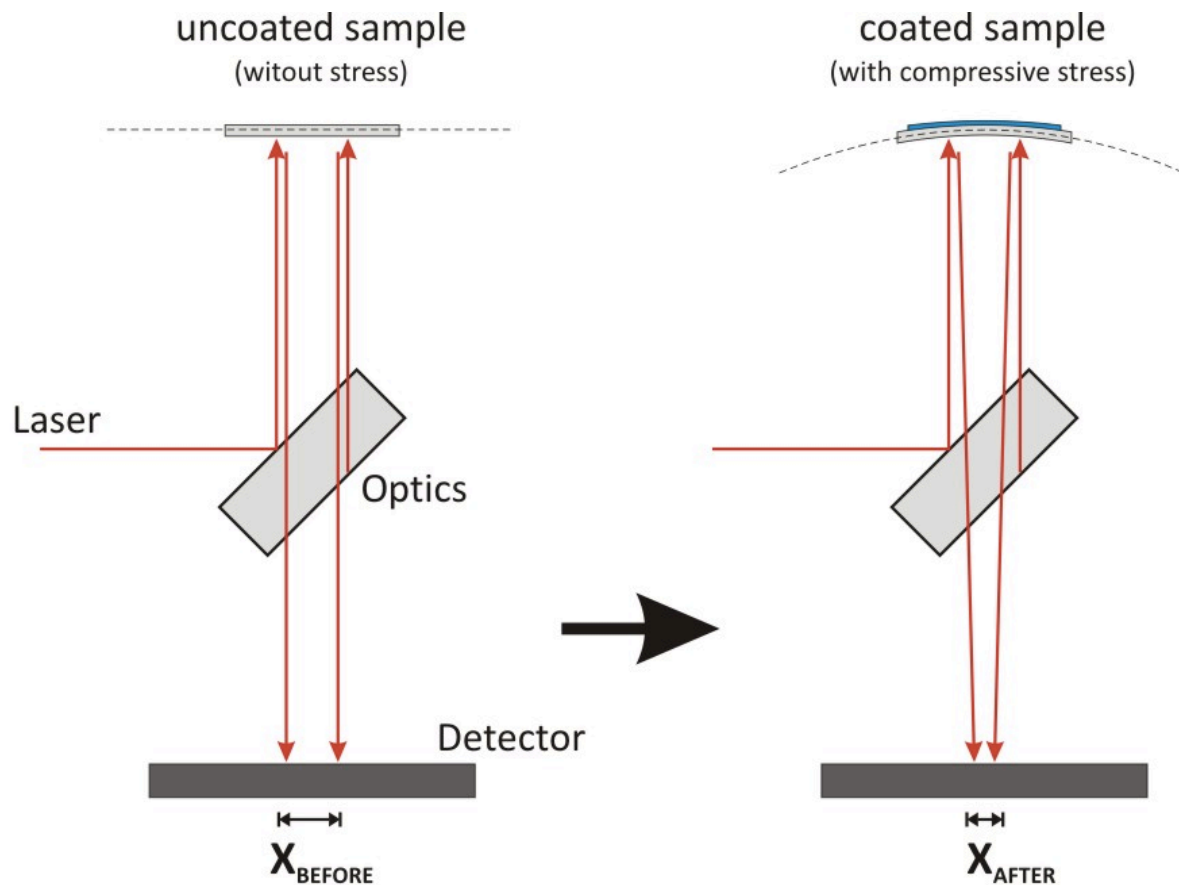


Figura 27 - Esquema de um feixe de raio laser para medição de curvaturas

Para o caso em questão realizaram-se medidas em pequenas chapas de Silício monocristalino, proveniente da Nanium. As medições foram realizadas antes e após depósito do EMC e respectiva cura (1h a 150 °C). Como o EMC é opaco, executaram-se todas as medições do lado oposto ao depósito do mesmo. Consideram-se portanto o inverso das tensões medidas - caso sejam de tração considera-se serem de compressão e vice-versa.

Com este procedimento é possível chegar a coeficientes de correlação aceitáveis para o ensaio em questão.

O mesmo procedimento foi feito com um substrato de aço mas, durante a cura, a chapa foi retirada do apoio resultando numa diminuição considerável no coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação ou coeficiente de Pearson é uma medida de intensidade de associação linear existente entre duas variáveis. Para variáveis correlacionadas, no limite, isto é, se a correlação for "perfeita" - como é o caso se considerarmos a correlação da variável x consigo própria, o coeficiente de correlação será igual a 1. Este coeficiente varia entre 0 e 1, ou -1 e 0 para o caso de correlação negativa [46, 47]. Quanto maior o valor do r (positivo ou negativo), mais forte a associação. No extremo, se $r = 1$ ou $r = -1$ todos os pontos no gráfico de dispersão caem exatamente numa linha reta. No outro extremo, se $r = 0$ não existe nenhuma associação *linear* [46,47]. Para que a equação de Stoney se possa aplicar, no ensaio usa-se o coeficiente de correlação para verificar se os pontos medidos após depósito se acomodam a uma linha recta, isto é, se a variação de comprimento medido entre pontos é constante. Assim assumiu-se considerar ensaios com $r > 99\%$, que correspondem a uma correlação muito forte [48].

Utilizou-se primeiro uma chapa de aço para testar o procedimento, sendo de esperar uma gama de tensão próxima do previsto pelo Abacus (por volta de umas unidades de MPa). Posteriormente procedeu-se à medição das wafers de silício (denominadas na empresa de *blank sílica*) que foram disponibilizadas com espessura de 0,35 mm.

Para cada medição ser rigorosa, a chapa não pode ser retirada do apoio. O apoio pode ser visualizado com a chapa de aço ligado na figura 28. Sendo assim cada medição levaria cerca de 2h a realizar. E o apoio além de ter de ser protegido com papel de alumínio na altura do depósito da camada de EMC, ia juntamente com a chapa para a mufla.



Figura 28 - suporte metálico (Al) para colocação de chapas a medir

Os resultados dos ensaios encontram-se de seguida. Para obtenção dos resultados foi necessário determinar previamente os seguintes parâmetros:

1. Espessura do substrato (chapa);
2. Espessura do filme (medido após depósito e subtraindo a espessura da chapa);
3. Coeficientes de Poisson do substrato;
4. Módulo de Young do substrato;
5. Distancia entre a amostra e alvo a medir.

O primeiro ensaio realizado, como já referido, foi considerado somente para efeitos de teste e familiarização com o método. É colocado na tabela 3 em contraponto para demonstrar a discrepância de coeficiente de correlação por se ter retirado este do suporte de medição para a cura do EMC.

Foram realizados algumas medições ao Si monocristalino, e os resultados obtidos encontram-se apresentados na tabela 3, que se segue. E pode ver-se uma folha de cálculo tipo na figura 29.

Tabela 3 - Tensão medida por raio laser com coeficientes de correlação e espessuras de filmes produzidos. (\bar{x} - valor médio dos 5 ensaios)

	Tensão (MPa)	Coeficiente de correlação	Espessura do filme produzido (μm)
Aço (teste)	-22,91	95,52 %	200
Si	10,50	99,40 %	300
	8,00	99,87 %	150
	9,87	99,51 %	400
	10,72	99,32 %	400
	11,80	99,63 %	600
\bar{x}	10,20	99,55 %	

A gama de valores obtidos acabou por ser superior do previsto pelo Abacus, cerca de 50% de erro (de 5 para 10,2 MPa). Contudo algumas considerações devem ser feitas acerca destes resultados. Este é um método expedito para de medir tensões impostas por filmes metálicos estes filmes refletem o raio laser pelo que o ensaio é efetuado primeiro na chapa e posteriormente diretamente no filme, pelo que, ao realizar as medições do lado contrário da chapa poderemos estar a introduzir alguns erros. Além disso, os depósitos metálicos são feitos com espessura de uns microns, e a equação de Stoney possui boa precisão para um rácio de espessura de filme sobre espessura do substrato de 1:100, para o silício com 0,35 mm de espessura deveríamos ter espessuras de depósito de EMC na ordem dos 3,5 μm , o que com as técnicas utilizadas não foi de todo possível. Conseguiu-se chegar a 300 μm , e não de forma muito homogénea. Para cumprir este parâmetro seria necessário chapas de silício bastante mais espessas pois de modo manual é impossível produzir um depósito homogéneo com espessura muito abaixo dos 300 μm . A dificuldade na produção de filmes finos de EMC é aumentada ainda com a extrema fragilidade do silício monocristalino que não permite o uso de muita pressão para retirar excesso de composto viscoso o que provoca problemas em espessura mas também em homogeneidade sendo este também um parâmetro bastante importante da equação de Stoney.

Ao longo dos ensaios, procedeu-se ao descongelamento do EMC que, como se pode ver na tabela 1, inclui um período de estabilização de 4h, e seu recongelamento e armazenagem. De salientar que, na Nanium, só se admite um recongelamento do EMC para produção. Para a empresa a perda de propriedades é crítica na conformidade dos produtos. Contudo para estudos como o presente, é referido que o material mantém as propriedades quase inalteradas até ao 3º recongelamento. No estudo realizado foram feitos no total 3 recongelamentos e foram detetadas alterações físicas do EMC logo após o 1º descongelamento, estas foram caracterizadas por um estado mais “vítreo” do composto o que aumentou ainda mais a dificuldade de depósito do mesmo. Esta alteração física poderá ter alguma influência nos valores obtidos, pois levou não só a que ao longo dos ensaios

se fossem produzindo filmes cada vez mais espessos, mas também poderá ter influência na própria cura do composto.

7.4 Análise de tensões por relaxamento de tensões

Nesta parte do trabalho executaram-se alguns ensaios mecânicos para obtenção de propriedades mecânicas do sistema EMC + Si, ou seja da *wafer*. Esta obtenção de propriedades tinha algumas finalidades, entre as quais, verificar a adesão dos EMC curados em T1 e T2 ao EMC por curar, caracterizar melhor a *wafer* pós *mold* - calcular resistências mecânicas, módulos de Young e alongamentos. A intenção era realizar ensaios de tração sobre as tiras das de uma das wafers produzidas, e das *wafers* T1 e T2 e de controlo. Não se conseguiu todavia criar condições para que as amarras segurassem as tiras sem estas escorregarem antes da rotura; assistia-se a um escorregamento das tiras a partir dos ~200 N, ou uma quebra precoce provocada pelo excessivo aperto. Independentemente dos esforços para tentar solucionar o problema com adesivos o resultado foi sempre o mesmo - escorregamento das amarras. Assim, não foi possível a obtenção de qualquer tensão válida tendo, no entanto, sido possível solicitar as tiras até a cargas na ordem dos 550N.

7.4.1 Relaxamento de tensões por processos térmicos e uso de extensómetros para leitura de deformações

Esta análise foi idealizada com o propósito de provocar o relaxamento de tensões por parte do EMC à temperaturas da primeira cura e antes da zona de queima (como na figura 15). Tendo lugar este relaxamento de tensões, por parte do EMC, a 150 °C, o silício ficará submetido a um estado de tensões reduzido. Este estado relaxado será considerado o nosso 0. Com o arrefecimento até à temperatura ambiente este voltará a ser pressionado pelo EMC que o irá fazer comprimir e provocar uma deformação. Sabendo a diferença de deformação entre o nosso 0 e o estado comprimido, e assumindo que esta é puramente elástica, podemos deduzir a tensão que está aplicada no Si.

Para medir este Δx desde os 150 °C até aos 25 °C foi necessário encontrar extensómetros aplicáveis, resistentes e sensíveis. A empresa recomendada para o efeito foi a HBM com sede em Espanha e foram daí seleccionados como apropriados para o efeito os extensómetros: 1-LY11-3/350.

Os extensómetros, de dimensões como se mostra na figura 30, aguentam a temperatura máxima de ensaio e possuem dimensões previamente estudadas para que pudessem ser fixados somente na área de Si (12 x 12 mm). Para garantir que estes se mantivessem acoplados ao *die* foi comprado, também na HBM um adesivo especial para alta temperatura (X280, que é uma resina epoxi com a particularidade de ter uma cura a baixa temperatura mas aguentar temperaturas de serviço da ordem dos 200 °C).

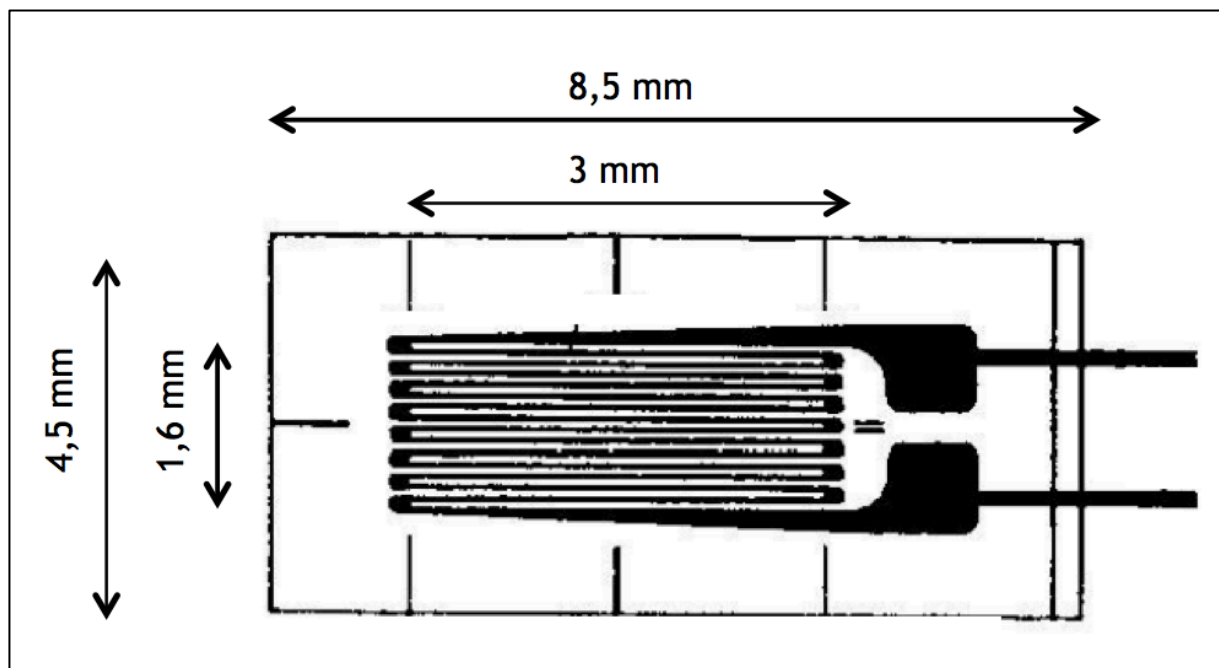


Figura 30 - Extensómetros tipo da HBM

Acoplaram-se extensómetros aos *dies* da wafer, aleatoriamente. E, em simultâneo, a silício sem EMC em seu redor (pedaço de *wafer* de *blank silica*). Este pedaço servirá de elemento de comparação para que, durante o aquecimento e arrefecimento, se possa desprezar o CTE do Si uma vez que ao sinal que se recebe em tempo real já lhe está a ser subtraído ao sinal recebido do Si livre.

Na figura 31 podemos ver algumas imagens do sistema montado, bem como do circuito elétrico com recetor (e amplificador) de sinal elétrico. Este sistema montado possui bolas de solda de estanho para ligar os pernos do extensómetro aos fios elétricos (fios normais de ligações de computador com extremidades personalizadas para o efeito, ver em anexo 3).

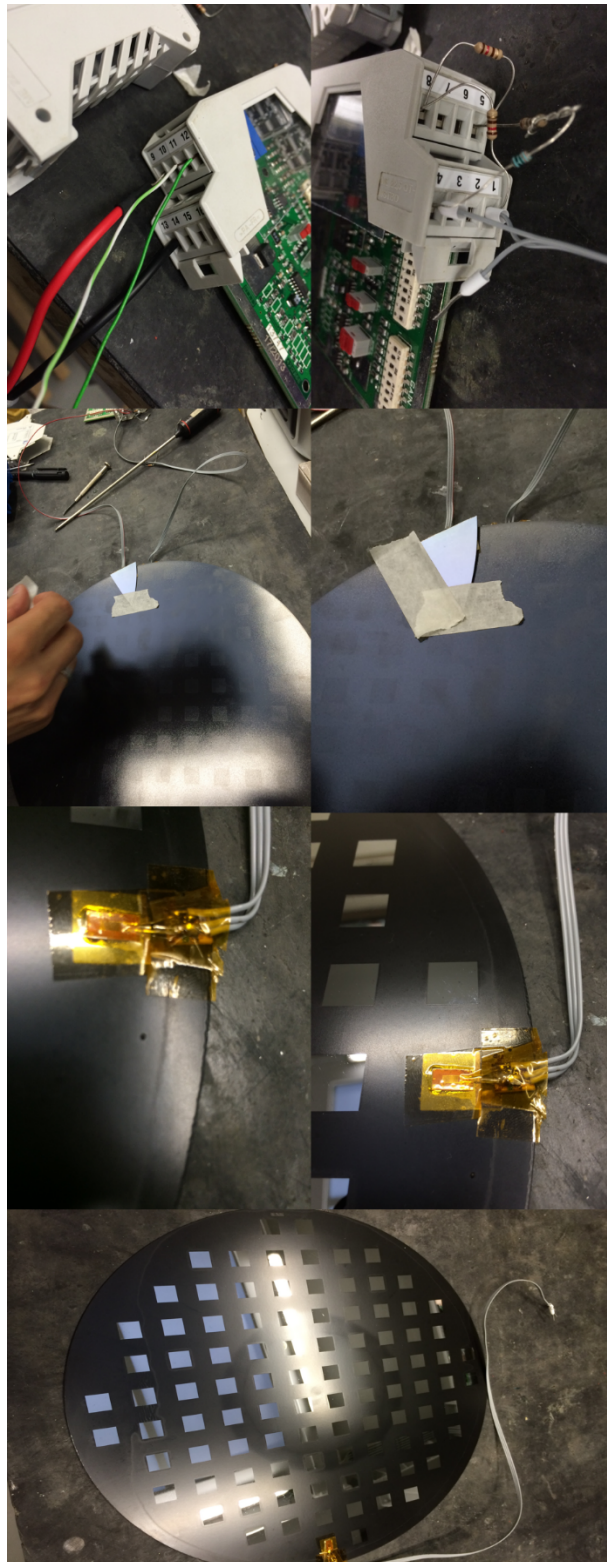


Figura 31 - Montagem de circuito para utilização dos extensômetros

Para a gama de temperaturas usadas, a solda possuía um ponto de fusão baixo, o que originou problemas logo nos primeiros instantes de ensaio pois o sinal elétrico perdia-se. Não foi possível apurar se a perda de sinal se devia a solda ou aos cabos em questão, que também eles não estavam preparados para temperaturas acima dos 100 °C. Não conseguindo modificar a liga, a tentativa de solução passou por procurar conetores, de cerâmica, que resistissem aos 150 °C e dispensassem a solda. Além disto tentou-se comprar cabos especiais ou proteções para os cabos existentes. Nesse sentido contactaram-se a HBM e RS empresas espanholas, a Aquário, com lojas por todo o Porto, e a TML, uma empresa japonesa que é representada pela EUROPAVIA em Espanha. Contudo não foi de todo possível obter cabos que preenchessem os requisitos, e nenhum dos fornecedores possuía conectores para satisfazer as necessidades.

Assim os ensaios realizados limitaram-se a tentativas das quais o sinal resultado era uma onda sinusóide que perde amplitude entre picos e cai sobre o 0 do eixo dos yy.

8. Conclusões e sugestões de trabalho futuro

O mundo de hoje depende dos circuitos integrados, da sua evolução e do seu poder de processamento. A Nanium com 19 anos de experiência na indústria de semicondutores oferece os melhores produtos e serviços com excelência pelos serviços de tecnologia eWLB.

É premente o controlo dos defeitos de fabrico destes componentes de modo a melhorar a qualidade. O controlo passa pela análise de todos os defeitos onde o mais recorrente deve-se a tensões residuais. É por isso importante a sua medição e análise.

As tensões residuais só podem ser medidas indiretamente. É necessário conhecer as propriedades do material e analisar o seu relaxamento para poder

calcular estas tensões. O uso de ultrassons ou DRX permite o cálculo de tensões sem destruir o material a analisar ou necessitar da libertação das tensões. Nestes casos a dedução das tensões é feita medindo outras propriedades da amostra.

Pela a fórmula de Stoney, para calcular uma tensão aplicada, é necessário medir o raio da curvatura ρ da chapa de Si. No ensaio de raio laser esse raio é possível ser obtido e foram por isso medidas tensões de compressão no Si de 10,20 MPa com coeficiente de correlação aceitável e acima dos 99%. De realçar que o mesmo ensaio para uma chapa de aço de não ligado deu um resultado bastante díspar deste pois indica tensões de tração. No entanto, este ensaio não foi realizado em condições ideais e apresenta um coeficiente de correlação fora do aceitável (~98%). De qualquer modo, os resultados encontrados com a chapa de Si, devem ser considerados com cuidado, e objeto de estudos complementares.

O uso de simulação de elementos finitos continua a ser uma técnica muito usada para prever problemas em junções, encaixes ou assemblagens. Mostra-se também importante para prever os gradientes de tensão existentes, nomeadamente analisar zonas de concentração, que neste estudo aponta para as arestas verticais do *die*. As antevisões feitas pelo Abacus são importantes não só por esse facto mas também para que se possa comparar com valores medidos em ensaios reais. O afastamento dos valores dados pelo Abacus (cerca de 50%) e dos valores medidos, têm fundamento em vários factores, nomeadamente, o software ser um ambiente ideal e que só considera o gradiente térmico e diferença de CTE. Este não leva em linha de conta com nenhum fator como: gradientes térmicos, espessura não homogénea de filme, e principalmente o efeito do *shrinkage* que se provou ter uma influência considerável no problema. A definição das condições de fronteira pode levar a erros de grande ordem caso não sejam bem consideradas. Em adição temos as condições do ensaio com o feixe laser que não cumpriram algumas premissas estipuladas na equação de Stoney: a relação da espessura de filme versus espessura de substrato e homogeneidade do depósito. Além disto podemos ter dado lugar para algum gradiente térmico que no arrefecimento de uma chapa tão fina quanto a usada (0,35 mm). Ainda assim o Abacus revelou-se eficaz, capaz e preciso.

Os ensaios realizados com os extensómetros e adesivo da HBM não produziram resultados. De facto, os extensómetros emitiram sinal, que se perdeu ao fim de poucos instantes à temperatura de ensaio. Na impossibilidade de adquirir cabos especiais, ou proteções para os existentes, conectores cerâmicos ou algum dispositivo que fizesse contacto entre o fio e o extensómetro, o tempo disponível não permitiu realizar mais experiências com os mesmos. Para futuros trabalhos nesta gama de temperaturas recomenda-se a compra de extensómetros que incluam conectores para os ligar dos terminais aos cabos elétricos

Os ensaios de tração às *wafers* produzidas especificamente para este trabalho também não resultaram porque não se conseguiu levar os corpos a rotura. Foram registadas tensões máximas na ordem dos 550 N, antes do escorregamento das amarras, sendo estimado que a tira de 12 mm de largura atingisse cargas na ordem dos 1200N. Nos ensaios, verificou-se escorregamento nas amarras bem como do extensómetro, que não acompanhava o movimento do corpo de prova. Para os ensaios de tração aconselha-se o uso de extensómetro vídeo para registar a deformação e amarras próprias para material frágil e pouco rugoso.

Os resultados do *die shift* revelam que apesar da preponderância do CTE no processo de contração no EMC, há também um peso considerável do *shrinkage* nesse comportamento, superior ao que alguns estudos apontam. O *die shift* é tanto maior quanto mais distante do centro da *wafer* se estiver, não obstante este efeito não é proporcional em todas as direções. Para *wafers* com EMC já curado obtém-se reduções na contração na ordem dos 50%; contudo, existem problemas de adesão entre *mold* curado e *mold* por curar. O *mold* por curar é imprescindível para ligar o *mold* curado aos *dies*. Poderá ser um processo a ser recomendado à empresa desde que consiga melhorar esta ligação entre *mold* com diferentes níveis de cura.

9. Bibliografia

[1] - Esperança, Diana, Empeno de wafers na indústria de semicondutores. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Fevereiro 2014.

[2] - "Semiconductors Strategies." Health. [consultado em 15 Mar. 2015]; Disponível em: <http://www.semiconductors.org>

[3] - "Faster, Greener, Smarter - Reaching Beyond the Horizon in the World of Semiconductors." PwC Technology, 14-18.

[4] - The Industry Handbook: The Semiconductor Industry | Investopedia." Investopedia. [consultado em 18 Jan. 2015]; Disponível em: <http://www.investopedia.com/features/industryhandbook/semiconductor.asp>

[5] - Japan Electronics and Information Technology Industries Association, JEITA ED-7306: Measurement methods of package warpage at elevated temperature and the maximum permissible warpage 2007: Tokyo.

[6] - Sequeiros, E. W., Empenos em substratos durante o processo de encapsulamento de memórias. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2009.

[7] - Shah, Agam. "Intel: Keeping up with Moore's Law is becoming a challenge". PC World.com. <http://www.pcworld.com/article/2038207/intel-keeping-up-with-moores-law-becoming-a-challenge.html> (acedido em: 10-05-2015)

[8] - Courtland, R. The Status of Moore's Law: It's Complicated. 2013 [consultado em 25 Jan. 2015]; Disponível em: <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-status-of-moores-law-its-complicated>.

[8] - Mann, Charles. "The end of Moore's law ?" technologyreview.com. <http://www.technologyreview.com/featuredstory/400710/the-end-of-moores-law/> (acedido em: 10-06-2015)

[10] - Pinto, Raquel, Medição de Adesão de Interfaces no Package Microeletrônico. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2013[

11] The Economist. “The end of Moore’s law.” Theeconomist.com. <http://www.economist.com/blogs/economist-explains/2015/04/economist-explains-17> (acedido em: 10-06-2015)

[12] - Efunda. “The definition of stress.” efunda.com. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/stress.cfm (acedido em 15-06-2015)

[13] - Nondestructive Testing “Stress and strain.” nde-ed.org. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/StressStrain.htm> (acedido em 10-06-2015)

[14] - Anderoglu, Osman. “Residual stress measurement using x-ray diffraction.” (Tese mestrado, Universidade Texas A&M, 2004)

[15] - Schajer, Gary S. e Clayton O. Ruud, “Overview of Residual Stresses and Their Measurement”, capítulo 1 em *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Chichester: Wiley, 2013

[16] - Lucas, George F., Peter C McKeighan, e Joy S. Ransom. “Non traditional methods of sensing stress, strain, and damage in materials structures” 2ª edição, Saline: ASTM Internacional, 2001.

[17] - Yonggang, Jin. “Next Generation eWLB (embedded Wafer Level BGA) Packaging” artigo, 12º Electronics Packaging Technology Conference, Singapura, 8-10 Dez. 2010.

[18] - Yu, Douglas. “TSMC keynoter suggests WLSI at IITC”. Solid State Technology insights for eletronics manufacturing. Junho, 2013.

[19] - GigaRadio “Enabling Technologies - Packaging and Integration Solutions”. gigaradio.eu/Technology.html.

[20] - Khong, Chee H.. “A Novel Method to Predict Die Shift During Compression Molding in Embedded Wafer Level Package” artigo, 59^a Electronic Components and Technology Conference, San Diego, 26-29 Mai. 2009.

[21] - Grupo de novos Materiais e Dispositivos. “3-1 Materiais para MEMS 2”. Gnmd.webgrupos.com.br.
http://gnmd.webgrupos.com.br/arquivo_disciplinas_download/3-1-Materiais-para-MEMS-2.ppt.pdf (acedido em 20-04-2015)

[22] - Nawab, Yasir, Shahid Salma, Boyard Nicolas e Frédéric Jacquemin. “Chemical shrinkage characterization techniques for thermoset resins and associated composites” em Journal of Materials Science. Nova York: Springer, 2013.

[23] - Enns, John B. e John K. Gillham, “Time-Temperature-Transformation (TTT) Cure Diagram: Modeling the Cure Behavior of Thermosets” Journal of applied Polymer Science, Vol. 28,2567-2591, 1983.

[24] - Carbas, Ricardo. “Effect of cure temperature on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives” em *Adhesively Bonded Functionally Graded Joints* (Tese doutoramento, Universidade do Porto, 2013) pág.31-52.

[25] - Penn State College of Engineering. “Thermal expansion and contraction”. Engr.psu.edu. Disponível em: <http://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/cracking/thermalexpansioncontraction/thermalexpcontr.htm> (acedido em 20-03-2015)

[26] - Universidade de Bolton. “CTE, coeficiente of termal expansion.” ami.ac.uk. http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0197_cte/index.html (acedido em 5-06-2015)

[27] Cverna, Fran. “Thermal expansion” capítulo 2 em “Thermal properties of metals” Ohio: ASTM Internacional 2002.

[28] - Bal Seal Engineering, 2015. “Coefficient of termal expansion for various materials at diferente temperatures” Disponível em:

http://www.balseal.com/sites/default/files/tr18_020707131421.pdf (acedido em 10-05-2015).

[29] Fei, Yingwei, “Thermal Expansion.” Washington, DC: American Geophysical Union. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.382.8250&rep=rep1&type=pdf#page=33>, pág.29-30.

[30] - Yoon KJ, J-S Kim (2001) Effect of Thermal Deformation and Chemical Shrinkage on the Process Induced Distortion of Carbon/Epoxy Curved Laminates. Journal of Composite Materials: 253-263.

[31] - de Boer, H.A.*, M.H.H. Meuwissen, M.C. van der Wekken, P.J.G. Schreurs*, M.G.D. Geers*. “Residual stress prediction for microelectronic packaging materials” artigo, Universidade Tecnológica de Eindhoven* e TNO Institute of Industrial Technology. Eindhoven. Disponível em: <http://mate.tue.nl/mate/pdfs/274.pdf> (acedido em 1-05-2015).

[32] - P.J., e H. K. D. H. Bhadeshia. “Overview Residual stress Part 2 - Nature and origins.”, em *Materials Science and Technology* Vol. 17, Manchester: IoM Communications, Abril, 2001.

[33] - Kim, Yeonsung, Hohyung Lee, Xin Zhang, and Seungbae Park, “Optimal Material Properties of Molding Compounds for MEMS Package”. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, N°10 vol.4, Outubro, 2014.

[34] - Budynas, Richard G., e Keith J. Nisbett. “Machine Design Tutorial 3-13: Stress Concentration” em *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8ª edição. McGraw-Hill, 2008. Disponível em: http://highered.mheducation.com/sites/dl/free/0073529281/365764/Ch03_Section13_Stress_Concentration.pdf. (acedido em 28-04-2015)

[35] - M. Prime B. e DeWald T.A., 2013, “The Contour Method,” capítulo 5 em *Practical Residual Stress Measurement Methods*, G. S. Schajer e Wiley-Blackwell, pág 109-138.

[36] - VEQTER Ltd, "Residual stress measurement overview", [veqter.co.uk](http://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/overview).
<http://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/overview>.

[37] - Petersen, Kurt E.. "Silicon as a mechanical material". Proceedings of the IEEE Vol.70 N°5. Maio, 1982.

[38]- Waters, Patrick, "Stress analysis and mechanical characterization of thin films for microelectronics and MEMS applications". Florida: Graduate Theses and Dissertations. <http://scholarcommons.usf.edu/etd/558>, 2008. 78-82

[39] - Carballo, Jose M., "Residual stress analysis in 3C-SiC thin films by substrate curvature method" (2010). Graduate Theses and Dissertations. Disponível em: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/1590> (acedido em: 22-06-2015)

[40] - Barile, Claudia, Caterina Casavola, Giovanni Pappaletta, and Carmine Pappaletta. "Remarks on Residual Stress Measurement by Hole-Drilling and Electronic Speckle Pattern Interferometry" artigo, The Scientific World Journal Volume 2014. Disponível em:
<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/487149/> (acedido em 14-06-2015)

[41] - Vishay Precision Group - Micro measurements. "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method". 1 Nov.2010

[42] - Azevedo, Álvaro F. M. "Método dos elementos finitos.". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª Edição. Abril, 2003.

[43] - Dano M-L, MW Hyer (1998) Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates. International Journal of Solids and Structures 35 (17):2101-2120.

[44] - Zarrelli, Mauro, Ivana K. Partridge, A. D'Amore. "Warping induced in bi-material specimens: Coefficient of thermal expansion, chemical shrinkage and viscoelastic modulus evolution during cure". Composites: Part A 37 (2006) 565-570. Elsevier Ltd. 2005.

[45] - Nawab Y, F Jaquemin, P Casari, N Boyard, V Sobotka (2013) Evolution of chemical and thermal curvatures in thermoset-laminated composite plates during

the fabrication process. Journal of Composite Materials 47 (3):327-339.
doi:10.1177/0021998312440130

[46] A. Lagace, Paul. “Yield (and Failure) Criteria”. <http://web.mit.edu/>.
[http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/materials/Lectures/M5.3-
Unified09.pdf](http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/materials/Lectures/M5.3-Unified09.pdf) (acedido em 15-07-2015)

[47] P. A., Flinn, D. S. Gardner, W. D. Nix, Measurement and Interpretation of Stress in Aluminum-Based Metallization as a Function of Thermal History, (IEEE Transactions on Electron Devices, 34, 689, 1987).

[48] Malva, Madalena “Análise de Regressão e Correlação” . [estgv.ipv.pt.](http://www.estgv.ipv.pt/) -
[http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/malva/MetodosElectro/Regress%C3%A3o.
pdf](http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/malva/MetodosElectro/Regress%C3%A3o.pdf)

10. Anexos

Anexo 1:

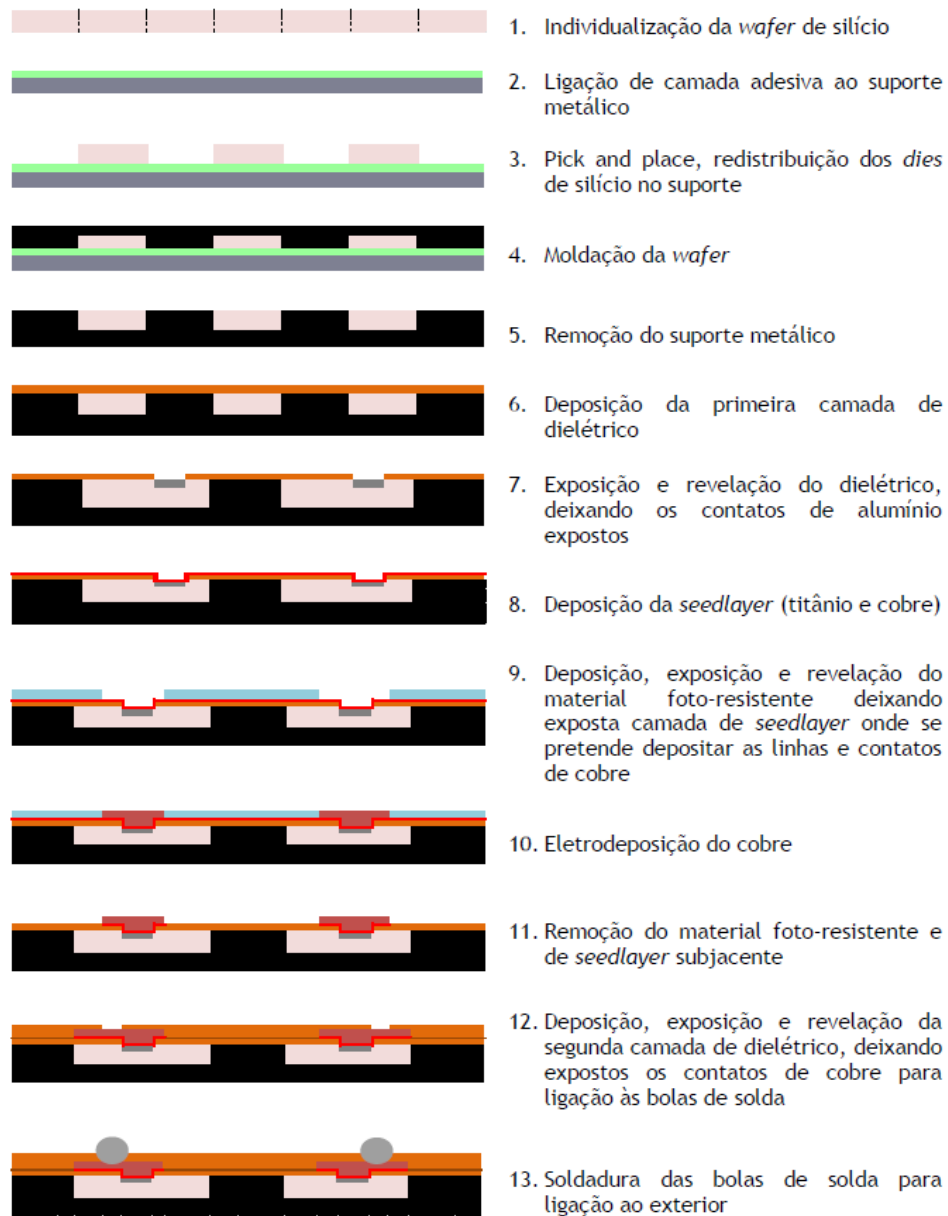


Figura 32 - Descrição pormenorizada do processo eWLB

Anexo 2:

Viscosity at 25 ± 1°C	650	400	900	Pa.s	D = 0	Y	Brookfield 5rpm (1)
Thixotropic index	2.0	1.0	3.0		D = 0	Y	Brookfield 0.5rpm/5rpm (1)
Specific gravity at 25.0 ± 0.5°C	2.01	1.98	2.04		D = 0	Y	(1)
DSC peak temperature	135	125	145	°C			(2)
Filler							
Filler content	89	88	90	wt%			(2)
Filler size	20		75	µm			(2)
Ash content	89	88					(2)
Cure conditions							
Cure temperature	150			°C			
Cure time	60			min			
Cured compound							
Cure shrinkage			1.2	%			(2)
Glass transition temperature Tg	160	155	170	°C		Y	DMA (1)
Coefficient of thermal expansion (below Tg)	7.5	5.0	10.0	ppm/°C		Y	TMA (1)
Coefficient of thermal expansion (above Tg)	30	22	42	ppm/°C		Y	TMA (1)
Flexural modulus @ 25°C	22	14	30	GPa		Y	DMA (1)
Flexural modulus @ 260°C	3	1	5	GPa		Y	DMA (1)

Figura 33 - Propriedades do EMC

Anexo 3:

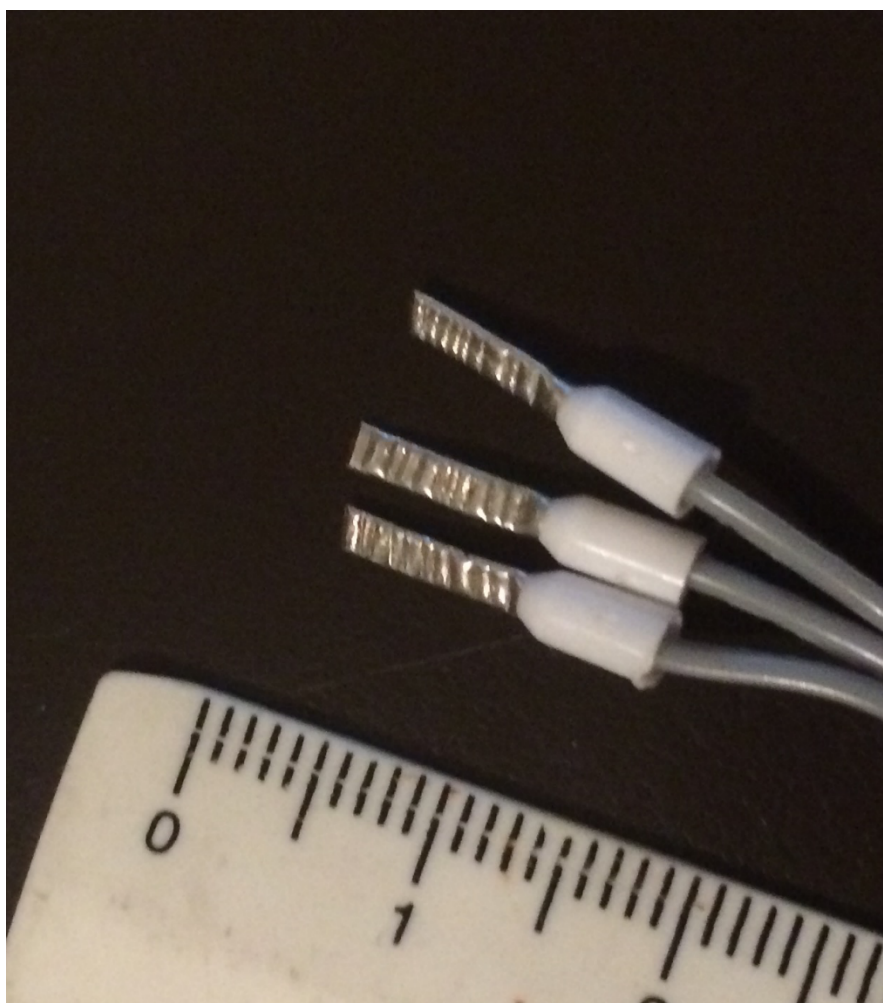


Figura 34 - Fios elétricos de computador usados (pormenor das pontas)